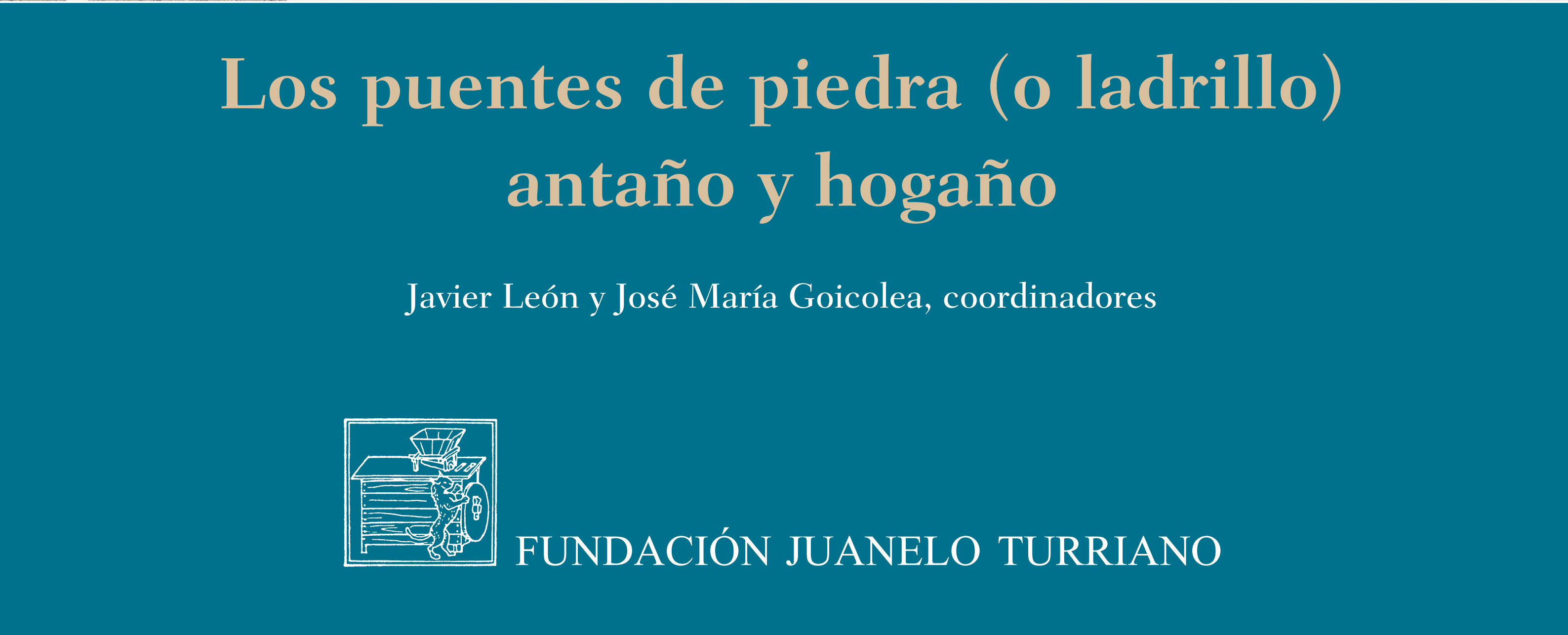
LECCIONES JUANELO TURRIANO DE HISTORIA DE LA INGENIERÍA

Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño

Javier León y José María Goicolea, coordinadores

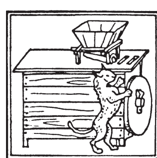


FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

LECCIONES JUANELO TURRIANO DE HISTORIA DE LA INGENIERÍA

Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño

Javier León y José María Goicolea, coordinadores



FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

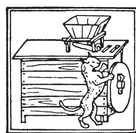


Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos

LOS PUENTES DE PIEDRA (O LADRILLO) ANTAÑO Y HOGAÑO

Conferencias impartidas en el curso:
«Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño», celebrado en la
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPM)
del 12 al 15 de julio de 2016 y organizado por la Fundación Juanelo Turriano.
Curso coordinado por Javier León y José María Goicolea

2017



FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos

www.juaneloturriano.com

Coordinación y revisión de textos:
Daniel Crespo Delgado

Documentación:
Begoña Sánchez-Aparicio García
Covadonga Álvarez-Quiñones del Gallego

Diseño, maquetación:
Ediciones del Umbral

ISBN: 978-84-945708-3-4
D.L.: M-6734-2017

Cubierta
Lámina 129 del tratado de CARL FRIEDRICH VON WIEBEKING *Theoretisch-Practische Wasserbaukunst* (1811-1814), con alzados de puentes diversos.

PRESENTACIÓN

Posiblemente, la sociedad actual no se ha parado a pensar hasta qué punto los puentes han tenido, tienen y tendrán impacto en la historia de la Humanidad y han influido de forma tan determinante en el desarrollo de la civilización. Precisamente la construcción de puentes se ha considerado uno de los síntomas reveladores de que un colectivo humano se preocupa por la estabilidad de sus asentamientos, el aseguramiento de las comunicaciones y, en definitiva, el dominio y la vertebración del territorio. A ese fin estaban destinados los puentes de la soberbia red romana, apenas enmendada durante la Edad Media.

En Occidente, el valor del puente fue creciendo en importancia a partir del siglo XVIII, cuando la Ilustración comprendió la necesidad de dotar a los pueblos de infraestructuras y la burguesía, instalada en el poder a partir de la Revolución Industrial, exigía un soporte adecuado a la expansión del comercio y de los movimientos humanos, creadores de riqueza económica. Los puentes se convirtieron en objetos de uso y, por tanto, en elementos vivos y expresiones de arte, de poder y de prestigio. El ímpetu creciente en la construcción de puentes inundó el mundo de obras de cada vez mayor variedad, y los puentes de piedra fueron perdiendo protagonismo en favor de los metálicos y los de hormigón, sucesivamente, con los que ya no podían competir.

No obstante, la experiencia enseña que, de entre todos, los puentes de piedra (o ladrillo) son los que han evidenciado mejor comportamiento y relación entre vida útil e inversión inicial, menores gastos de mantenimiento y, en definitiva, son los más sostenibles.

A estas alturas del siglo XXI, ¿qué papel juegan los puentes de piedra?, ¿qué valor socio-cultural tienen?, ¿cabe hablar de innovación en torno a nuevos puentes de fábrica? A reflexionar sobre estas cuestiones ha estado llamado este curso, desde distintas perspectivas: la histórica y cultural, la sostenibilidad, la función social, el cálculo estructural, el mantenimiento y gestión de los puentes de piedra, su presente y futuro, etc. Este curso se organizó en colaboración entre la Fundación Juanelo Turriano y la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, desarrollándose en esta última entre los días 12 y 15 de julio de 2016. Con esta actividad la Fundación Juanelo Turriano prosigue su labor en el estudio e investigación de la historia de la tecnología y la ciencia.

ÍNDICE

1
Algunas reflexiones acerca del trato dispensado a los puentes de piedra o ladrillo

JAVIER LEÓN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de la ETSICCP. UPM

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los puentes de piedra o ladrillo siguen ocupando un puesto muy importante en las redes de carreteras (del orden de un 15 % sobre el total en promedio de los diferentes tipos de red) y de ferrocarriles (hasta el 35 % de los puentes de la red convencional), pero han sido ignorados o incluso tratados con displicencia por muchos ingenieros. Tampoco la opinión pública es del todo consciente de su existencia, excepto cuando la carretera o vía férrea sufre un corte porque colapsa total o parcialmente. Y eso que los puentes de piedra o de ladrillo tienen mucho de telúricos, más apegados al terreno y a sus habitantes que los fríos e industrializados puentes modernos, excepciones aparte.

Son considerados como piezas de un pasado que se simplifica igualitariamente y se les envuelve, en el mejor de los casos, de un vago romanticismo, ya caduco. Son seres olvidados, ninguneados. Solo algún representante eximio aparece en las guías turísticas y recibe algunas visitas [FIGS. 1 y 2], muchas menos de las que merecen estas construcciones cuya configuración, proceso constructivo, función e historia, superan de largo a otras más insustanciales.

Se ignora que los puentes de piedra o ladrillo, en su gran mayoría, responden equilibradamente a los tres principios que estableciera Vitruvio para la Arquitectura (en sentido lato): la belleza (*venustas*), la firmeza (*firmitas*) y la utilidad (*utilitas*) o función. La percepción de la sociedad, alimentada en gran parte por los propios ingenieros, es que de los puentes solo deben esperarse prestaciones funcionales y resistentes. Ese ha sido, por desgracia, el énfasis que ha primado en muchas administraciones, autores de reglamentos, constructores, docentes e investigadores.



FIG. 1 CHARLES CLIFFORD, Puente de Alcántara, 1860. Biblioteca de la ETSICCP. UPM.

El objetivo del curso de verano que ha dado pie a este texto fue precisamente el de presentar a los interesados en participar en el mismo las múltiples facetas de estos puentes, a cargo de cualificados representantes de la Administración, la docencia y la investigación, la lingüística, la historia, la gestión del patrimonio, etc. Incluso participamos algunos ingenieros y petrólogos.

Además de recordar el papel funcional que siguen jugando estos puentes, y de reivindicar su papel socio-cultural, en el curso se trataron los enfoques técnico y constructivo, presentando también el margen que aún dan a la innovación, con visiones retrospectiva y de horizonte futuro, de manera cruzada, para entender estos puentes y amarlos. Porque si verdaderamente se quiere preservarlos, hay que enseñarlos para conocerlos y así, como sucede con casi todo lo que se entiende, se les acaba queriendo, porque el amor siempre fue el motor de las buenas causas.



FIG. 2 Puente de Toledo, Madrid.

EL TRATO DE LA SOCIEDAD Y DE LOS RESPONSABLES POLÍTICOS

Como suele suceder, la llamada «opinión pública» tiene una idea más bien vaga e inconcreta acerca de lo que son y pueden seguir representando los puentes de piedra o ladrillo. Se les suele suponer atemporales y pensar que siempre han estado ahí, como si fuesen un don que la naturaleza ha otorgado a los pueblos. Por cierto, los niños, que suelen dibujar las cosas tal y como las ven desde su simplificada y bendita mentalidad, han venido mostrando los puentes por sus formas predominantes, las de los arcos [FIG. 3].

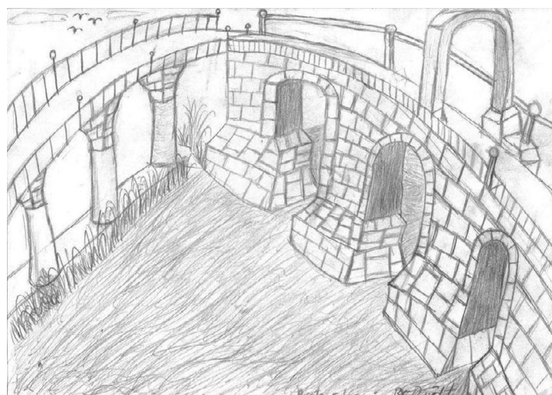


FIG. 3 Puente sobre río. DAVID T.

Muchos usuarios y los responsables políticos, siempre los de las administraciones más cercanas, creen, y no les falta razón, que los puentes de piedra o ladrillo son estrechos y poco o nada funcionales para las necesidades del tránsito moderno y que, por consiguiente, se trata de piezas obsoletas [FIG. 4]. Apenas despiertan el interés de los turistas, salvo excepciones, y están en carreteras secundarias. No es menos cierto que los inspectores de puentes (León, Corres y Prieto, 2008; León, 2015) tenemos la fortuna de poder disfrutar de una perspectiva de estos que no tienen otros ciudadanos, lo que refuerza la idea de que rescatar o promover los paseos ribereños, en el ámbito urbano o peri-urbano, contribuye decisivamente a disfrutar del paisaje al que pertenecen los puentes. Es el caso de Madrid-Río.

Al mismo tiempo, los puentes (no solo los de piedra o ladrillo) son hitos y puntos de encuentro, de solaz, incluso cuando se convierten en ruina [FIG. 5], tanto si esta se consolida como tal –como el archiconocido caso del puente de Mostar, de enorme valor simbólico, víctima de la guerra de la antigua Yugoslavia y reconstruido con ayuda internacional tras la hecatombe– como en aquellas ocasiones, muy raras, en que se res-





FIG. 4 Puente sobre el río Baztán entre Uharte y Ariztegi (Navarra), en la carretera NA-4403.



FIG. 5 Ruina del puente de Sauveterre-de-Béarn sobre el río Oloron.



FIG. 6 Pont Trencat en Sant Celoni (Barcelona), rehabilitado con audacia y acierto por Xavier Font (2003).

cata la función de paso que tuvo el puente tras su muerte, incluso casi dos siglos después, como es el caso del Pont Trencat en Sant Celoni (Barcelona) (Font, 2004), repuesto en 2003 a partir de una iniciativa ciudadana articulada en torno a una asociación impulsada, entre otros, por Xavier Font y financiada con cargo a fondos públicos [FIG. 6]. Se trata de una señera excepción en el contexto en que lo público, por ser de todos, no es de nadie a la hora de tomar iniciativas. Sobre esta cuestión volveremos después.

En efecto, no es infrecuente que, como se dice más adelante, los puentes de fábrica, como los de otros tipos, adquieran notoriedad mediática cuando sufren el embate de la corriente y acaban colapsando, o cuando son víctimas de guerras, abiertas o no, ya que siempre fueron elementos estratégicos. Se valora entonces el que la carretera o la vía se corte, y solo algunos lloran su pérdida como elemento patrimonial. Son los mismos que saben distinguir los puentes romanos de los medievales, o los del siglo XVIII con respecto a los de la última época de los puentes de piedra o ladrillo, en las primeras décadas del siglo XX. Huelga decir que, si bien es común encontrar ciudadanos capaces de distinguir una iglesia románica de una gótica o barroca, es harto improbable, incluso entre ingenieros, dar con personas capaces de asignar un puente, a la vista de su morfología y sus detalles, a la época constructiva correspondiente. No es solo una cuestión de erudición; implica matices mucho más importantes. Aun será más raro encontrar quienes, además de pronunciarse sobre la época del puente, lo hagan con relación a la ruta a la que da soporte, a su historia, al territorio que vertebra. Esa ignorancia, que confieso ruborizado, revela un desconocimiento notable del papel social y transversal de la ingeniería, que no se nutre solo, en absoluto, del embeleso de las estructuras, sino que tiene connotaciones mucho más amplias y trascendentes.

Sin embargo hay algunos oasis en este paisaje no muy alentador. Al ejemplo citado más arriba se suma el de algunas comunidades –tanto más conscientes del valor de sus puentes cuanto más cultas son– que atesoran en sus museos el legado de sus puentes. Es el caso, por desgracia infrecuente, del Deutsches Museum de Múnich o del Museum für Geschichte de Basilea, al que pertenecen las imágenes de la figura 7: una maqueta que muestra una fase del proceso de construcción del puente (sobre un río tan importante como es el Rin) y el martinete de hinca de los pilotes de su cimentación, así como las puntazas de dichos pilotes de madera con sus azuches, tal y como se conservan tras su





FIG. 7 Arriba: modelo de la pasarela de madera utilizada para la construcción de las cimentaciones del puente sobre el Rin (Rheinbrücke). A la derecha: martinete de hinca de los pilotes, en cuyo extremo inferior se puede ver el azuche de hierro. Museum für Geschichte, Basilea. Fotografías del autor.

hallazgo en el curso de unas obras realizadas a finales de la década de 1970.

Iniciativas como ésta[1] son dignas de encomio y deberían tener una proyección mayor que la del círculo, muy reducido, de los aficionados a estos puentes.

EL TRATO DE LOS INGENIEROS (ADMINISTRADORES, PROYECTISTAS Y DOCENTES) Y OTROS PROFESIONALES DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

No cabe sino hacer referencia a la ya aludida ignorancia que de estos puentes y sus circunstancias tienen los ingenieros. Se trata, para empezar, de construcciones cuya morfología se ignora, al igual que la terminología de los elementos que los componen [FIG. 8], puesto que hace ya muchos decenios que ni se proyectan ni se construyen, ni se enseñan en las escuelas de ingeniería. Vocablos como «salmer», «hom-

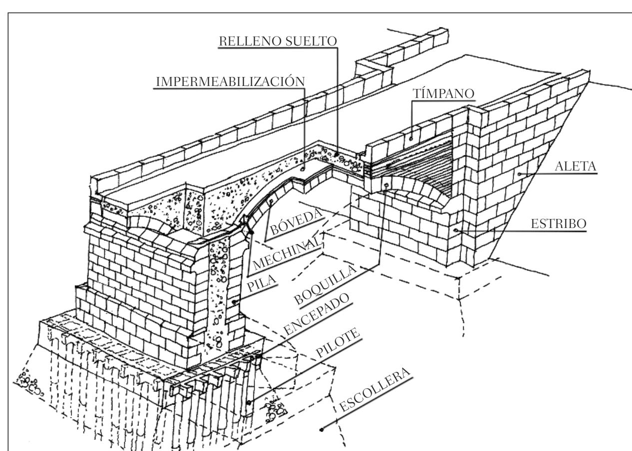


FIG. 8 Terminología asociada a los elementos típicos de un puente de piedra o ladrillo. Comité de Puentes de la ATC-AIPCR. Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 1999.



FIG. 9 Rehabilitación del puente sobre el río Jarama en Algete, 1980.



FIG. 10 Deterioro de una bóveda de ladrillo con boquillas de sillería. Fotografía del autor.

bros», «aristón», «boquilla», etc. son poco o nada conocidos entre los ingenieros de hoy, pero están claramente identificados en los tratados y libros de texto de otros tiempos (Gaztelu, 1910 y 1919) y, más recientemente, en un glosario de términos (Comité de Puentes de ATC, Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 1999) elaborado para ponernos a tono, entender los textos de cuando se proyectaban y construían estos puentes y para entendernos entre nosotros mismos[2].

La figura 9 muestra el caso de un puente reparado y ensanchado por insignes ingenieros en 1982 y en cuya intervención se deja ver que sus autores, salvo circunstancias que yo ignore, no supieron o no quisieron aprovechar las potencialidades resistentes de pilas y, sobre todo, bóvedas de fábrica. Vaciado el trasdós de las bóvedas, se construyó un puente sobre el puente, apoyado en los pilotes ejecutados en las pilas y ocultos por estas. Las razones de este desperdicio, si se admite el calificativo, de este desconocimiento, son las mismas ya citadas al mencionar el olvido de morfologías y nomenclatura: el abandono del proyecto y construcción de este tipo de puentes.

Sin embargo, hay que decir también que, afortunadamente, desde la última década del siglo pasado se están haciendo esfuerzos muy importantes para recuperar esta disciplina. Así, cabe citar, entre otros, a: Fernández Troyano y Manterola , 1994; ATC, Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 1999, 2002, 2008 y 2014; Martín-Caro, 2001; Martínez, Martín-Caro y León, 2003; Martínez, 2003; Durán, 2005 y 2010; León y Espejo, 2007; Proske y Gelder, 2009; Ramos y León, 2013; González Parejo, 2014; Ramos, 2015; Todisco, 2016; o el propio curso de verano que ha dado pie a estos textos que ahora publica la Fundación Juanelo Turriano.

Sucede también que los puentes de piedra o ladrillo se deterioran. Mucho menos que los hechos de otros materiales estructurales más modernos, pero se deterioran [FIG. 10]. De manera que si se une el ya citado desconocimiento de los puentes de fábrica de piedra o ladrillo al hecho de que, en general, los ingenieros saben poco acerca de los mecanismos de degradación de los elementos constitutivos de los puentes modernos, se dan las condiciones idóneas para no actuar en el momento adecuado o para hacerlo torpe y brutalmente. Se trata de un argumento más para justificar la necesidad de formar a los técnicos en el vasto y apasionante mundo del conocimiento de los materiales, las técnicas para su exploración, preferentemente las no destructivas, las técnicas de reparación, etc. Todo



FIG. 11 El puente de piedra protagonista en los billetes de euro. De menor a mayor importe se representan puentes romanos, medievales y modernos.

un reto para los ingenieros del presente y del inmediato futuro, para sus formadores (ADIF, 2009; García de Miguel, 2009) y para toda una multitud de profesionales especialistas en materias muy diversas.

EL TRATO DE OTROS (ARTISTAS, LINGÜISTAS, HISTORIADORES, PERIODISTAS, ...)

Los responsables del Banco Central Europeo eligieron la imagen del puente como estandarte de lo que la moneda única, el euro, habría de representar: vínculo de unión, de intercambio, de progreso. Siempre fueron eso los puentes duraderos, los de fábrica. No cabe duda de que los diseñadores de los billetes estuvieron muy bien aconsejados por expertos, quizás ingenieros, y de que dieron en el clavo [FIG. 11].

No tan expertos, precisamente, son los periodistas, que se mueven en el difícil equilibrio de saber de todo sin ser especialistas de nada y a quienes parece resultar gratis escribir cualquier cosa, aunque la expresión esté llena de incorrecciones si no de graves errores que distorsionan totalmente la realidad [FIG. 12]. A ellos, necesarios porque informan


CONSECUENCIAS LLUVIAS ›

Cae parte de la barandilla del puente de piedra de Villamuriel de Cerrato lo que obliga a cortar la carretera

El río Carrión alcanza el nivel de alarma a su paso por Celadilla y en Guardo una tromba de agua provocó inundaciones

Estado en el que ha quedado el puente / Junta Castilla y León

FIG. 12 Erróneo concepto que de «barandilla» demuestra tener el periodista, cuando son tajamar, tímpanos, relleno y plataforma los realmente afectados.



FIG. 13 Viñeta de ANTONIO MINGOTE, Antología ABC. Puente del siglo VIII.

de lo que pasa en un mundo que necesita de la imagen y del titular, también habría que educarlos.

Hay excepciones brillantes, como la del genial y sagaz Mingote con evidente componente artística, que viene a dejar constancia, con mordacidad, del valor del puente de piedra y de la ingeniería de antaño con relación a ciertas construcciones más modernas, como se ejemplifica en la viñeta que se reproduce en la figura 13, y a quien se puede perdonar el hecho de que no nos conste que se construyeran puentes en el siglo VIII, aunque los árabes que invadieron la Península en muy poco tiempo sí debieron hacer uso de los magníficos que habían construido los romanos.

El mal empleo terminológico de los periodistas que hablan de los puentes, trae a colación lo oportuno que es el que lingüistas como Eve Bauder (Bauder, 2007), también participante en este curso de verano, se preocupen por la precisión terminológica, reivindicándola, diseccionando los términos e identificando sus etimologías y evolución en el tiempo, su uso descriptivo, apoyado o no en la metáfora, a partir de una revisión de los textos de ingenieros de antaño que no hacen los de hogaño.

Algunos pintores han dirigido al puente su especial mirada, sin hacerse eco de la espectacularidad de su obra, ni de sus valores técnicos, sino como elementos del paisaje. Es el caso de Van Gogh [FIG. 14], quien retrató, si se admite el verbo, un humilde, diríase que vulgar, paso inferior con aire casi de túnel, y eso que el artista pudo ver otras obras de



FIG. 14 VINCENT VAN GOGH, *Paso inferior (Le viaduc)*, 1887. Solomon R. Guggenheim Museum, Nueva York.



FIG. 15 JOAQUÍN SOROLLA, *El ciego de Toledo*, 1906. Meadows Museum, SMU, Dallas, EE.UU.

mucha mayor envergadura. También es el caso de Sorolla, que dedicó uno de sus cuadros al puente de Alcántara de Toledo [FIG. 15]. El título del cuadro es toda una evocación al significado del puente: objeto que une el campo y el núcleo urbano, salva el obstáculo que representa el río y crea paisaje, aunque de esa imagen no pueda dar fe el ciego que, sin embargo, ha podido disfrutar del puente. También se está viviendo ahora una suerte de ceguera colectiva cuando se goza de un puente, lo que se hace de manera inconsciente e incompleta, porque aunque se usa, no se observa en sí mismo y en el contexto que le rodea, que queda realzado por el puente mismo.

Los poetas, también artistas que pintan con la palabra, han dedicado versos a los puentes[3]. Es el caso de Blas de Otero, quien escribió en 1964 el poema *Delante de los ojos*, en el libro *Que trata de España* y que refleja la continuidad y permanencia intemporal del puente de piedra:

Puente de piedra, en Zamora,
sobre las aguas del Duero.
Puente para labriegos, carros,
mulas con campanillas, niños
brunos.
Vieja piedra cansada
de ver bajo tus arcos
pasar el tiempo.

Junto a la orilla, baten
las aceñas, España
de rotos sueños.
Cuando el poniente pone
sutil el aire y rojo
el cielo,
el puente se dibuja
tersamente, y se oye
gemir el Duero.

O el caso de la argentina Elsa Bornemann (1952-2013) que escribió el siguiente poema, tomado de *El libro de los chicos enamorados*, que evoca con gran plasticidad lo que representa el puente en la mirada declaradamente subjetiva de la autora. Buscando o no la rima, obsérvese los piropos que le dedica a los puentes de piedra: *irrompibles*, *invisibles*. Ninguno de ambos calificativos es cierto, pero lo parece.

Yo dibujo puentes
Para que me encuentres:
Un puente de tela,
Con mis acuarelas…
Un puente colgante,
con tiza brillante…
Puentes de madera,
con lápiz de cera…
Puentes levadizos,
Plateados, cobrizos…

Puentes irrompibles,
de piedra, invisibles…
Y tú… ¡Quién creyera!
¡No los ves siquiera!
Hago cien, diez, uno…
¡No cruzas ninguno!
Mas…como te quiero…
dibujo y espero.
¡Bellos, bellos puentes
para que me encuentres!

Historiadores, bibliotecarios y arqueólogos son también de ayuda indispensable para situar cada puente en su contexto temporal, social (y técnico), y base imprescindible para la documentación y el estudio. Son capaces de hacer lecturas de paramentos, estratos, materiales, marcas de cantería, así como del contexto (viario, edificado, etc.), del que no siempre, ya se ha dicho más arriba, es consciente el ingeniero.

RAZÓN DE SER DE UN CURSO DE VERANO SOBRE PUENTES DE PIEDRA O LADRILLO

La idea partió de la Fundación Juanelo Turriano, quizás de Bernardo Revuelta, Pedro Navascués o José María Goicolea. Quizás estuviera ya en su cabeza antes de que, en abril de 2016, se inaugurara la ya aludida exposición *Los puentes de fábrica en la Biblioteca de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid*, iniciativa de Conchita García Viñuela, alma de la Biblioteca, Leonardo Todisco, reciente y pujante doctor ingeniero, y de mí mismo. La exposición presentó algunos de los fondos bibliográficos de valor inestimable que atesora nuestra Biblioteca, que han sido digitalizados en gran parte y puestos a libre disposición de cualquier persona interesada en la materia.

Quizás, decía, la idea fuese anterior a la exposición, que convivió con el curso, pero la exposición nos inspiró para organizar el curso de verano, abierto a todos los que quisieran tener una idea de lo que son, de lo que han sido y de lo que aún pueden ser los puentes de piedra o ladrillo, desde la óptica diversa de los historiadores, bibliotecarios, los responsables de su mantenimiento, los gestores del patrimonio construido, los que saben de sus materiales, historiadores, lingüistas, los que los restauran, los que enseñamos cómo son y cómo funcionan, y hasta los que proyectan soluciones actuales en piedra o ladrillo.

Los puentes de piedra o ladrillo fueron, son y seguirán siendo el soporte imprescindible para el comercio y los movimientos humanos, creadores de riqueza económica. Pero no solo son objetos de uso, sino elementos vivos y expresiones de arte, de poder y de prestigio (algo parecido, salvando las oportunas distancias, a las catedrales góticas de la Baja Edad Media), si bien con un protagonismo de perfil bajo, poco o nada fomentado por quienes tienen la responsabilidad de definir y potenciar el valor socio-cultural de este patrimonio que, turistas y locales, ignoran o infravaloran.

Se pretendió también que el curso, trufado con coloquios de mucha altura, sirviera de foro de debate sincero y abierto, equilibrado entre la necesaria visión retrospectiva y el futuro de un patrimonio que hay que mantener y engrosar con otros criterios.

Se organizó una visita a algunos puentes de fábrica cercanos a la Escuela, todos ellos sobre el Manzanares: San Fernando, Los Franceses, Segovia y, cómo no, Toledo. Valga la anécdota siguiente para explicar una situación que no es en absoluto representativa de la inmensa mayoría de los ciudadanos. Cuando iniciábamos la visita al puente de San Fernando, un automóvil, ocupado por una madre y su hijo de unos 10 años, se detuvo junto a nosotros. La madre, con leve acento extranjero, preguntó de qué año era el puente. De 1750, contesté. Ella reconvino cariñosamente al niño que, al parecer, defendía que el puente no era del siglo XVIII, como sí suponía la madre, segura de sí misma. Muy agradecida se despidió, y boquiabiertos nos quedamos los turistas del curso.

NOTAS

1. La exposición sobre los fondos bibliográficos de la Biblioteca de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, abierta hasta unos pocos días después de concluir el citado curso de verano, incluía unos modelos en madera, a diferentes escalas, que dan fe de la preocupación de la Administración y de los ingenieros por dejar constancia de lo construido y de servir de base pedagógica a los ingenieros en ciernes. La Fundación Juanelo Turriano mostrará también modelos de este estilo en el contexto de una ambiciosa exposición en el Cuartel del Conde Duque, en Madrid, entre junio y septiembre de 2017.
2. Resulta curioso comprobar, a propósito, cómo algunos términos reciben denominaciones diferentes en ingeniería y en arquitectura, como es el caso del *tímpano*, muro de contención del relleno del trasdós de las bóvedas, sobre la boquilla, rematado habitualmente por el pretil [FIG. 8] y de la *enjuta*, que es el mismo muro dispuesto sobre el arco formero de las naves bajas de las iglesias o catedrales, bajo el triforio. Como ya se ha indicado, suele estar mucho más extendida la denominación utilizada en el ámbito de la arquitectura que la de la ingeniería.
3. Selección de los textos, por encargo del autor, de la filóloga María Teresa Barbadillo.

BIBLIOGRAFÍA

ADIF (2008), *Inspección y diagnosis de puentes ferroviarios de fábrica*, Madrid.

BAUDER, E. (2007), *Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

DURÁN, M. (2005), *La construcción de puentes romanos en Hispania*, Santiago de Compostela, Xunta de Galicia.

DURÁN, M. (2007), *Reposición Puente medieval Nova*. http://www.eicduran.com/es/ingenieria_civil_historica/puentes_de_piedra/reparacion_puentes/ponte_nova.aspx

DURÁN, M. (2010), *Algunas cuestiones teóricas y prácticas sobre la reparación de los puentes de fábrica*, Actas del I Congreso Internacional de Carreteras, Cultura y Territorio, A Coruña.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. y MANTEROLA ARMISÉN, J. (1994), «Vivencia y supervivencia de los puentes históricos en la red viaria actual», *Carreteras*, nº 70, Asociación Española de la Carretera.

FONT, X. (2004), *Restoration of the Pont Trencat. Barcelona, Spain. (Arch'04)*. https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Restoration%20of%20the%20Pont%20Trencat%20(Broken%20Bridge).%20Barcelona,%20Spain_0.pdf.

GARCÍA DE MIGUEL, J. M. (2009), *El tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones*, Madrid, Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.

GAZTELU, L. (1910), *Resumen de las lecciones de puentes de fábrica y algunas de puentes metálicos explicadas por el profesor Luis Gaztelu*. Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Imp. del Asilo de Húerfanos del S.C. de Jesús.

GAZTELU. L. (1919), *Práctica usual de los cálculos de estabilidad de los puentes. Exposición elemental*. Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Librería Internacional de Adrián Romo.

GONZÁLEZ PAREJO, J. M. (2014), *Puentes romanos y medievales en la provincia de Cáceres*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR) (1999), *Primer glosario de términos empleados en puentes de fábrica*. Separata del número 70 de *Rutas*, enero-febrero.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR (2002), *Ensillado de bóvedas*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR (2008), *Cimentaciones de fábrica en puentes*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR (2014), *Criterios de intervención en puentes de fábrica*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras.

HEYMAN, J. (1995), *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*, Madrid, CEHOPU - Instituto Juan de Herrera (Santiago Huerta), ETS de Arquitectura.

LEÓN, J. (2015), «Algunas consideraciones sobre la intervención en puentes de piedra o ladrillo», *Revista de Obras Públicas*, 162 (3562), pp. 51-62.

LEÓN, J., CORRES, H. y PRIETO, F. (2008), «Inspección y evaluación de estructuras existentes: una tarea para ingenieros valientes», *Revista de Obras Públicas*, 155 (3492), pp. 29-38.

LEÓN, J. y ESPEJO, S. (2007), «Load test to collapse on the masonry arch bridge at Urnieta», en *Arch'07, 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal, 12-14 September 2007*, pp. 969-976.

MARTÍN-CARO ÁLAMO, J. A. (2001), *Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

MARTÍNEZ, J. L. (2003), *Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

MARTÍNEZ, J. L., MARTÍN-CARO, J. A. y LEÓN, J. (2003), *Evaluación estructural de puentes arco de fábrica*. Monografías sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

PROSKE, D. y GELDER, P. VAN (2009), *Safety of Historical Stone Arch Bridges*, Berlín-Heidelberg, Springer.

RAMOS, A. (2015), *Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

RAMOS, A. y LEÓN, J. (2013), «Clasificación morfológica de los rellenos en el trasdós de bóvedas de fábrica», *Informes de la Construcción*, vol. 65, nº 532, octubre-diciembre, pp. 471-480. Madrid.

TODISCO, L. (2016), *Funicularity and Equilibrium for high-performance conceptual structural design*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

VITRUVIO POLIÓN, M. (1787), *Los Diez Libros de Arquitectura*. Traducción del latín y comentarios de Joseph Ortiz y Sanz. Reedición de Akal, Madrid, 1992.

Volver al índice

2
Los puentes de piedra y la metáfora

EVE BAUDER
Dra. en Lingüística Aplicada. UPM

INTRODUCCIÓN

A primera vista, probablemente resulte insólito pensar que las construcciones técnicas no se fundamenten exclusivamente en cálculos matemáticos o leyes físicas. Por lo tanto, sería razonable suponer que los antiguos maestros de obra, así como los ingenieros y arquitectos de hogaño, se limiten al uso privativo de criterios asociados.

Sin embargo, en el ámbito de la construcción, la interacción de diferentes campos técnicos y humanistas, cuyos conocimientos, intercambio y aplicación activa vienen siendo reclamados y practicados desde al menos el siglo I a.C., cuando el arquitecto romano Marco Vitruvio (1985) redactó sus «Diez libros de Arquitectura» y hablaba de «la recíproca conexión y mutua comunicación» entre todas las artes y ciencias.

Respecto a los puentes, la interdisciplinariedad técnica-lingüística cobra especial relevancia, dado que puentes y lenguas comparten la más antigua *razón de ser*: su facultad comunicativa. Debido a este paralelismo, existe una vinculación *natural* entre los técnicos, la sociedad y los filólogos o, en otras palabras, entre la técnica constructiva de puentes, las exigencias socio-culturales y el lenguaje. En el caso de los puentes de piedra, este vínculo destaca, además, por su carácter sistemático y continuo: para crear, describir y divulgar su obra, los ingenieros y arquitectos –aunque no sean plenamente conscientes de ello– se sirven de la metáfora antropo-médica, como herramienta principal.

Por esta razón, mediante una aportación técnico-lingüística explicativa y ejemplificada del lenguaje metafórico de los puentes de piedra al ámbito de los ingenieros y arquitectos relacionados con estos nobles puentes, se pretende *hacer explícito lo que está implícito*.

Simultáneamente, este puente técnico-lingüístico tiene por objetivo poder contribuir, de forma práctica, a la restitución de la memoria constructivo-terminológica perdida

acerca de los puentes de piedra, fundamental ante la imperante necesidad de tomar las medidas precisas y urgentes para poder asegurar su tratamiento, recuperación y conservación adecuados.

ANTECEDENTES LINGÜÍSTICO-TÉCNICOS

En el primer capítulo del Libro Primero de la citada obra, titulado «Qué es Arquitectura y qué cosas deben saber los arquitectos», Vitruvio subraya la estrecha relación entre la medicina y la construcción, cuando instruye a los arquitectos sobre la importancia de tener en cuenta qué parajes son *nocivos* y cuáles *saludables* para poder construir *edificios sanos*. Puede que hallemos aquí los primeros ejemplos de metáfora entre la construcción y la medicina, manifiestas claramente en la terminología utilizada.

A pesar de los cambios y avances colosales en el arte de construir desde entonces hasta tiempos actuales, este paralelismo técnico-médico no solo se mantiene fielmente, sino que se extiende incluso al área del comportamiento humano-constructivo.

Como manifestación de esta evolución, sirvan de ejemplo tres aforismos estructurales del libro homónimo, escritos por el prestigioso ingeniero de caminos Javier Rui-Wamba (1998): «La inestabilidad estructural tiene mucha similitud con la inestabilidad del comportamiento de los seres humanos», «la fatiga estructural depende, prioritariamente, de la amplitud y frecuencia de las variaciones tensionales» y «las patologías estructurales son el modo en que nuestras estructuras manifiestan su disgusto por el trato que han recibido en su concepción, proyecto, construcción o utilización».

Por otro lado, no debería de extrañar la semejanza metafórica entre el ser humano y el arte de construir: concuerda con la forma natural de la evolución del hombre. Recuerdan Steinman y Watson (1984) al respecto, que el hombre aprende de lo que (re)conoce –la naturaleza en todos sus ámbitos, incluyendo su propio cuerpo y el comportamiento de sus prójimos–, imitando y deduciendo relaciones y funciones análogas que aplica a sus descubrimientos, como en el caso de las proporciones de una obra, cuya simetría refleja las del cuerpo humano. Asimismo, amplía esta afinidad a la denominación de las medidas correspondientes: el dedo, el palmo, el pie y el codo [FIG. 1]; términos polisémicos que han perdurado en el tiempo.

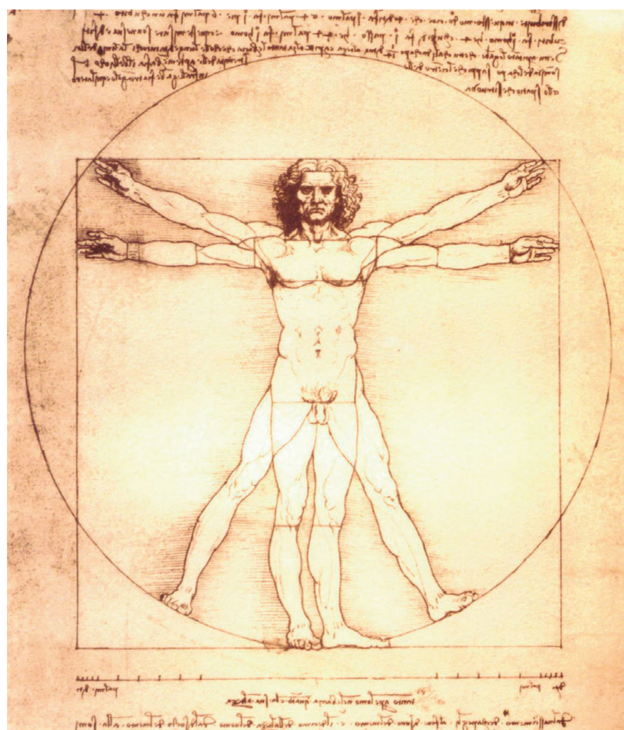


FIG. 1 LEONARDO DA VINCI, *Homo ad quadratum et homo ad circulum*, h. 1490.

El fundamento metafórico-conceptual

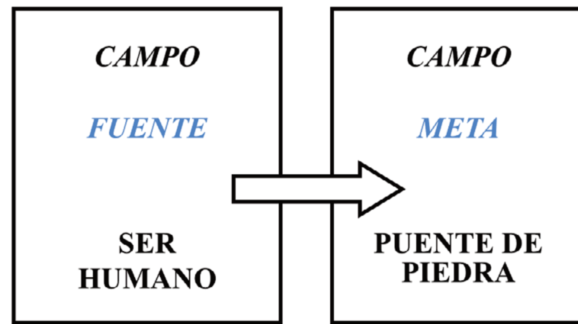


FIG. 2 El principio metafórico.

Para aumentar y organizar sus conocimientos y, por tanto, para hacerse con una comprensión menos limitada del mundo en todas sus facetas –progresar y evolucionar en el más amplio sentido–, el ser humano utiliza el conjunto de sus recursos y conocimientos. Aquello incluye todos los factores cognitivo-lingüísticos que el hombre pensante aplica a lo todavía por descubrir y a lo abstracto, aunque desconozca las correlaciones procesales subyacentes. De esta capacidad evolutivo-humana surgen la producción de los conceptos y la utilización de la metáfora, ya que «la esencia de la metáfora es entender y experimentar una cosa en términos de otra», según especifican los lingüistas americanos G. Lakoff y M. Johnson (1980), creadores de este concepto metafórico.

El principio funcional de este *metaphoric mapping*, se define como la proyección (*mapping*) metafórica de un campo (o dominio) conceptual origen (o fuente) –*source domain*– a otro campo conceptual meta (*target domain*) diferente, donde el concepto del dominio meta se estructura, se entiende, actúa y se expresa, parcial o completamente, en términos del concepto del campo fuente. En otras palabras, la imperante necesidad del ser humano de utilizar la metáfora como recurso indispensable de expresión en cualquier ámbito no se produce de forma arbitraria sino que se conservan los aspectos o rasgos importantes de conceptos y estructuras de los esquemas de imágenes coherentes con los campos relacionados.

Radica precisamente en este mecanismo de proyección la clave de la utilización de la metáfora humana y de su reflejo metafórico-terminológico resultante entre el campo de la construcción y el ser humano: las similitudes intuidas y la coherencia sentida entre los conceptos de estos dos ámbitos incide, de manera paralela, en el lenguaje empleado.

Además, cuanto mayor grado de identificación y compromiso con su obra sienten los actuales ingenieros y arquitectos –como antaño sus maestros antecesores–, tanto más se incrementa el empleo lingüístico análogo.

Precisamente por esta razón, en el caso de los puentes de piedra la correspondencia metafórico-terminológica entre la vida humana y el puente [FIG. 2] manifiesta una sistematicidad extraordinaria, ya que para sus antiguos constructores, así como para los especialistas técnicos que de ellos se (pre)ocupan ahora, la metáfora «EL PUENTE DE PIEDRA ES UN SER HUMANO» constituye la realidad (Bauder, 2007).

LA UNICIDAD DEL CASO DE LOS PUENTES DE PIEDRA

Por un lado, la señalada «relación íntima» que siente el maestro constructor de antaño o el técnico especialista-cuidador de hogaño por el puente de piedra, se explica por su historia y cualidades, por el proceso constructivo y su peripecia posterior. Por otro, aun-

que a partir de aproximadamente los años 50 del siglo pasado se dejó de construir con la piedra o el ladrillo, debido a la importancia cuantitativa y cualitativa de los puentes de piedra (o fábrica) aun existentes en España, el ingeniero o arquitecto que se encarga actualmente del estado de estos puentes, vuelve a experimentar la misma sensación de implicación cercana e, incluso, extiende su identificación metafórico-terminológica, al ritmo que aumenta la variedad de problemas a la que se tiene que enfrentar en su papel de técnico-cuidador.

Así pues, para llegar a una mejor comprensión de la profundidad y complejidad de la relación metafórica-conceptual entre el puente de piedra y el especialista técnico hay que explorar, primero, la vida de ambos.

Luces y sombras en la vida de los puentes de piedra, sus pontífices y cuidadores

Cabe recordar que el puente de piedra es el primero duradero, después de los puentes naturales y de madera. Sin embargo, su origen –al igual que el origen del hombre– no se sabe fechar con exactitud y varía según los autores: entre los años 2500 (Heinrich, 1983) y 3500 (Steinman y Watson, 1984) a.C. Respecto a la fecha más antigua, ya no solo se trataría de un tosco puente de losas de piedra, sino del tipo más genuino: el formado por bóvedas. Asimismo, según el primer autor citado, la existencia más numerosa de este segundo tipo de puentes se remontaría al siglo VII a.C. (en Mesopotamia o Etruria), adjudicándose al puente de Teverone (Italia), el primero romano, supuestamente construido en el año 600 a.C.

Los puentes romanos, extendidos por todo el Imperio, son también numerosos en Hispania. La razón de esta supremacía cuantitativa, aún hoy, reside en la idoneidad del emplazamiento, de la cimentación y de la robustez de sus pilas, bóvedas, rellenos y tímpanos. Constituyeron modelos a seguir, arquetipos del puente de fábrica, en general, por las razones siguientes.

En primer lugar, constituyen hitos del ingenio, es decir, de la seña de identidad humana más destacable. Por ser los primeros puentes duraderos, indudable es, asimismo, su valor social de la comunicación: hacen posible cubrir las necesidades de abastecimiento e intercambio de bienes e ideas. Igualmente, por el arte de su construcción, es innegable su valor arquitectónico: se integran armoniosamente en el entorno y forman parte importante del patrimonio histórico-artístico. Además, gozan de una cualidad tremendamente actual: de entre todos los tipos de puente, los de piedra (o fábrica) constituyen el *paradigma* de sostenibilidad, puesto que son los que menos recursos energéticos han consumido para su construcción y los que más durabilidad han exhibido.

No obstante, estos puentes –igual que los seres humanos– no son eternos, de vida ilimitada, sino que sufren achaques y deterioros, como afirma J. León (2002, 2005, 2007, 2008), quien subraya a continuación que precisamente por todas las citadas propiedades espléndidas, es más rentable su rehabilitación que construir unos nuevos. Afortunadamente en los últimos años esta reflexión certera ha ganado terreno entre los técnicos (*Jornadas sobre la vida de los puentes*, 2005; Fraile Cuéllar, 2011, entre otros) y en las Administraciones.

Cierto es también que la preocupación por cuidar estos puentes no es nueva: ya los romanos se ocupaban no solo de perfeccionar la técnica constructiva de puentes nuevos sino de restaurar, rehabilitar y conservar los ya existentes.

Con todo, desgraciadamente, aquel conocimiento se perdió en el último siglo casi por completo, por lo que los cuidadores se encuentran ahora con la escasez de documentación (o el desconocimiento sobre la existente) relativa a los procesos constructivos originales y los antiguos métodos de mantenimiento, así como el «olvido» casi completo de la terminología ligada a ellos. De hecho, empiezan a encontrarse artículos sobre ellos a partir de 1850, coincidiendo con la fundación de la pionera *Revista de Obras Públicas*, y vuelven a escasear a partir de la segunda década del siglo XX hasta bien entrados los años 90.

La proyección metafórico-terminológica estructurada

No cabe duda de que para *entender* los puentes de piedra en todos los aspectos constructivos y descriptivos, así como para tratarlos adecuadamente, es imprescindible recuperar o conocer la terminología unida a ellos.

Así, para el técnico especialista en los puentes de piedra, el concepto metafórico de «EL PUENTE DE FÁBRICA ES UN SER HUMANO» incluye las distintas etapas del ciclo vital humano y del puente [FIG. 3].

Además, por esta proyección metafórica estructurada y sistemática del campo fuente (hombre) al campo meta (puente), relativa a circunstancias, acciones y estados vitales, el técnico-especialista la interioriza hasta llegar al máximo de aspectos humanos del ciclo vital del puente de piedra: desde la planificación familiar, la gestación, el nacimiento, la paternidad responsable del constructor-padre, el bautizo y la importancia del nombre propio, el aspecto físico (forma e imagen), las partes vitales del cuerpo del puente, las cualidades o defectos congénitos de materiales, la sinergia de las partes vitales, el crecimiento, el desarrollo y la reproducción, la plenitud (sentido y funciones de su vida), el prestigio, la admiración y el respeto, el reconocimiento al padre-constructor, la anamnesis

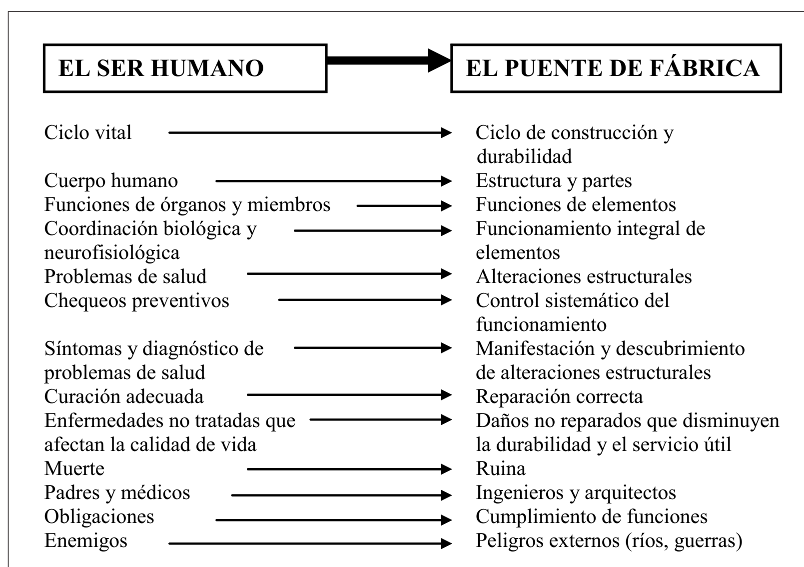


FIG. 3 Proyección metafórica y correspondencias de «EL PUENTE DE FÁBRICA ES UN SER HUMANO».

y terapia, la notoriedad del constructor-médico, los enemigos, la defensa y precauciones contra enemigos y agresiones, hasta la jubilación, la muerte natural y violenta, la eutanasia (muerte-derribo provocada para evitar sufrimientos, p. ej. en caso de muerte-ruina inminente), la autopsia y los herederos y la herencia (p. ej. transplante de órganos).

Asimismo, por concordancia y coherencia de este principio metafórico lo extiende sistemáticamente –cual *continuum* lingüístico motivado– a la terminología que emplea para concebir, explicitar y difundir su obra que se plasma en términos antropo-médicos, como se verá en la siguiente ejemplificación práctica.

EJEMPLIFICACIÓN

La terminología de los puentes de piedra tiene una parte *consensuada*, es decir, términos aceptados en su ámbito de especialidad. Gracias a la monografía de la revista *Rutas* de la Asociación Técnica de Carreteras, titulada *Primer glosario de términos empleados en puentes de fábrica* (1999), recopilados por el Grupo de Trabajo de Puentes de Fábrica del Comité de Puentes, comenzó a allanarse el camino hacia el rescate de aquella.

La otra parte es la *no-consensuada*, esto es, los términos *utilizados* por los especialistas en la práctica, aunque no formen (aún) parte de una obra de consulta técnica oficial.

Sin embargo, como se aprecia en la denominación oficial de los elementos que componen el puente de piedra [FIG. 4], y, asimismo, en los ejemplos de los otros términos que siguen, en ambos casos la terminología obedece a la misma proyección metafórico-lingüística descrita.

Aunque para cada una de las mencionadas etapas de la vida se encuentran múltiples ejemplos de correspondencia terminológica, su longitud excedería ampliamente el marco establecido para este artículo. Por ello, la selección se limita a diez ejemplos, escogidos de entre diferentes estadios del ciclo vital, y distintas épocas, con el propósito de que sean ilustrativos del uso de la metáfora «EL PUENTE DE PIEDRA ES UN SER HUMANO».



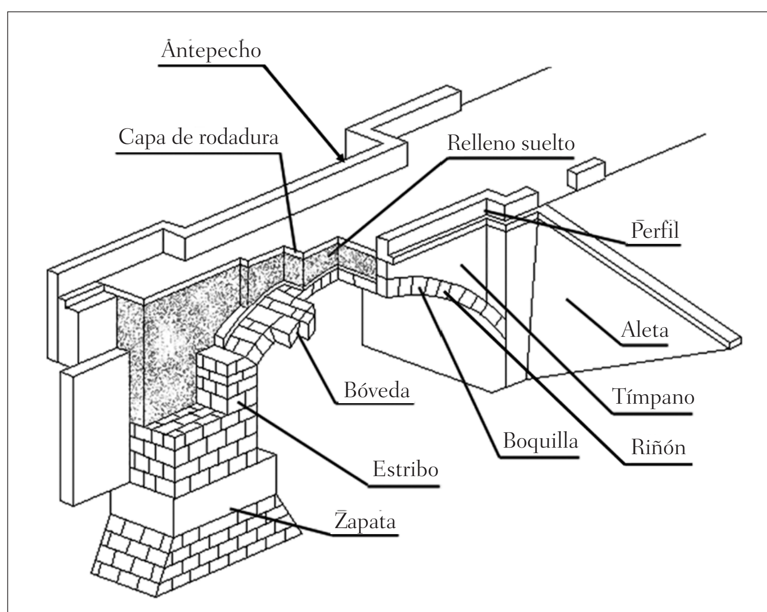


FIG. 4 Elementos de un puente de piedra (Martín-Caro, 2001).

La gestación

La gestación del puente es la evolución de una idea, de un proyecto de puente, con que el ingeniero proyectista o el arquitecto «anda embarazado», es decir, desarrolla y lleva consigo en «cuerpo y alma».

El puente de fábrica es gestado.

Puente de Zulema: «¿Es [...] posible que un constructor como Rodrigo Alfonso [...] **concibiera** el descabellado proyecto de construir un puente sin cimientos? [...]. Nosotros, al menos, **no lo concebimos**» (Herrera y Bonilla, 1869).

Puente sobre el Ebro (Logroño): «Mas atendiendo al fin esencialmente utilitario y práctico que se propusieron sus autores **al concebir** y desarrollar **el proyecto** [...]» (Martín Gil, 1897).

La paternidad responsable del constructor-padre

Aunque la prueba de paternidad no es siempre concluyente (la determinación de la autoría exacta de un puente de fábrica es aun más difícil que la de su fecha de nacimiento) y, muy a menudo, solo se reconoce una paternidad *gentilicia*. Sin embargo, la paternidad «adoptiva», es decir, el constructor que cuida de un puente que no es suyo, es muy común. Además, si nos preguntamos qué es lo más importante para un hijo, llegaríamos, indudablemente, a la siguiente conclusión: un padre que *ejerce* de padre, es decir, que se ocupa y preocupa sentimental y materialmente de las necesidades de su hijo, sea o no el padre biológico.

El padre del puente siente y practica su paternidad.

Puente sobre el Tajo: «[...] **me encapriché con el puente**, [...] mala cosa, porque **le tomé cariño**, y ahora **he de llorarlo** [...]; **la presa** [...] aparece siendo el **"culpable"** en este caso. **La víctima es un "hijo" mío** [...] ya que –¡todo sea por el progreso!– la cola del embalse de Alcántara lo cubrirá con treinta y cinco o cuarenta metros de altura de agua por encima de su rasante. Séale permitido a **un viejo algo sentimental** –que, con los recuerdos acabados de apuntar, **se ha rejuvenecido por un momento en muchos años– el despedirse aquí, como se despidió *in situ*** hace unos días, de **su puente del Tajo**, **al que**, parodiando una conocida frase latina, **cabe desear**: *Sit tibi acqua levis*» (Del Pino, 1969).

Experiencia técnica: «**La intervención** [en el puente de piedra] **del técnico en el momento presente** es un hito más en **el proceso de interacción entre la obra y sus constructores y sustentadores**, lo que el prof. Mola denomina "**un continuo acto de amor**"» (León, 2002).

La importancia del nombre propio

Si el bautizo del puente de piedra –igual que para los humanos– se celebraba «por todo lo alto» –acudiendo muchas veces incluso el Rey y su Corte (León y Bauder, 1999)– dar nombre a un puente e incluso, a veces, a algunas partes o elementos del mismo, era habitual en la antigüedad (Fernández Ordóñez, 1989), dada la suma importancia de la que

gozaban estas infraestructuras en la vida de los hombres. Y como a un hijo, no se les daba un nombre cualquiera, sino según el grado de religiosidad, espiritualidad o superstición, o como agradecimiento a «mecenas» eclesiásticos o monárquicos, o por la importancia de pueblos o ríos, se les *distinguía* con dicho nombre. Es más, a veces se invertía el proceso y era el puente mismo el que daba nombre a pueblos y otros asentamientos, como por ejemplo es el caso de Pontevedra («puente vieja»), de Saarbrücken («puente sobre el Saar»), de Cambridge («puente sobre el Cam»), etc.; sin olvidarse, además, del origen del término «pontífice» («hacedor de puentes»).

EL PUENTE DE FÁBRICA LLEVA UN NOMBRE ELEGIDO (POR SU PROGENITOR, CUIDADOR, ETC.)

El antiguo puente de Pont-de-l'Arche: «Hacia la una de la tarde [...] el tajamar de arriba de la pila derecha del **arco núm. 10**, **conocido con el nombre de arco de la Croix**, se desprendió de pronto [...], la mitad de **los arcos** 7 y 8, **llamados del Moulin** se separaron...» (*Revista de Obras Públicas*, 1857).

*Puente de **Alma*** (sobre el Sena), año 1855 (Riaño Calleja, 1858). *Puente de la **Concordia*** (sobre el Sena), años 1787-1792 (ibídem).

*Puente del **Arzobispo***: «El pueblo de Puente de Arzobispo, **llamado así por haber sido un arzobispo quien mandó fabricar su puente**...» (Machimbarrena, 1927).

*Puente de **Zulema*** (sobre el Henares): «Otra circunstancia ha venido también [...] a picar nuestra curiosidad: **el nombre del puente**. **¿No es extraño, en efecto, que se llame de Zulema** un puente construido por un arzobispo cristiano, en los tiempos de mayor intolerancia religiosa, y en una localidad donde no han vuelto a dominar los árabes?» (Herrera y Bonilla, 1869).

*Puente de **Alcántara*** (sobre el Tajo); y *Puente de **Alconétar***: «[Que] aquel sitio se llama Alconétar [Provincia de Cáceres] –en árabe, plural de Alcántara, "el puente"–…» (Del Pino, 1969).

El aspecto físico: forma e imagen (general y adornada, vestida y calzada)

En el caso de los puentes de fábrica, la armonía de «los rasgos», es decir, la simetría de las proporciones del cuerpo del puente y de sus miembros y la nobleza de los materiales preocupaban mucho a sus maestros. Incluso los diferentes efectos ópticos se tenían en cuenta y se optimizaban, y, por supuesto, la *coronación* del puente, bien mediante la ornamentación de la última fila de sillares, el embellecimiento de pilares o tajamares, bien mediante torreones, estatuas, etc., era indispensable para destacar su naturaleza *real*. Únicamente solían hacer concesiones a sus elevados criterios de belleza y elegancia cuando se producían eventuales problemas de estabilidad o por motivos económicos.

LA APARIENCIA FÍSICA ES IMPORTANTE PARA EL PUENTE DE FÁBRICA.

Consejos estéticos: «Un pequeño libro [...], cuyo objeto es **dar reglas sencillas** para determinar **las mejores y más elegantes dimensiones que deben darse a las diferentes partes que componen un puente**» (Riaño, 1858).

Puente de Isabel II (Bilbao): «**[...] tales son las circunstancias locales [...] y las condiciones desfavorables que imponen, que no hay posibilidad de edificar una verda-**

dera ***obra de arte*** **que reúna a bellas proporciones el aspecto monumental que requiere** la importancia y riqueza de esta invicta villa y el punto céntrico en que se ha de establecer […]. Pero esa enorme masa de hierro [...] daría a la obra **un aspecto tan pesado y privado de elegancia y buen gusto**, que hemos desechado desde luego esta idea. [A pesar de las condiciones económicas] **debe sacrificarse algo a ciertas condiciones artísticas y de ornato**, […más de tres arcos] hubieran ofrecido **un aspecto raquítico y algo miserable**» (Ibarreta, 1876).

Plenitud (sentido y funciones de su vida)

Dar sentido a su vida o tener una vida plena significa para el puente estar en óptimas condiciones físicas para poder desempeñar sus funciones plenamente y durante mucho tiempo. Todas esas funciones forman parte de su papel principal que es la comunicación, a cuyo servicio se presta con devoción y aguante, ya que salva todo tipo de obstáculos (ríos, valles, etc.) para conseguirlo.

El puente de fábrica se realiza cumpliendo con sus obligaciones.

Puente de Isabel II (Bilbao): «Construido en 1847, **se resintió** a los pocos años una de las pilas, de modo que en 1863 fue necesario suprimir el puente levadizo, que además **no prestaba grandes servicios** [...]. Cuando sucedió la última avería del puente, Bilbao **se encontró sin más comunicación con la orilla opuesta, que el antiguo puente de San Antón** […]. A fin de **atender a las primeras necesidades**, el excelentísimo Ayuntamiento construyó una de las pasarelas y estableció […] **un puente provisional** de madera [...]. Pero desde el momento que concluya la guerra [...], serán **del todo insuficientes las comunicaciones existentes y habrá necesariamente que establecer una nueva capaz de llenar todas las necesidades**. Comprendiéndolo así el excelentísimo Ayuntamiento, resolvió que se hiciera el estudio de **un nuevo puente** [...]. Bajo el **punto de vista de solidez y duración no hay comparación posible** entre una de sillería que **atraviesa intacta e inalterable siglos enteros** y una construcción de hierro **cuya vida no ha consagrado aún la experiencia**» (Ibarreta, 1876).

Con carácter general: J. Manterola (1997) afirma que «**el puente se manifiesta de una manera "culta"**, no en el pasar de un lado a otro, sino **en esa posibilidad de encarnarse, de transformar la vida de un individuo, de configurarla**».

Prestigio

La admiración y el respeto que despierta y recibe el puente de fábrica, llevados, a veces, a niveles divinos de veneración, se debe, sobre todo, a sus innumerables cualidades de excelencia (durabilidad y aguante, belleza destacable, etc.); «esa potencia espiritual creadora de un espacio» (Fernández Ordóñez, 1989). Pero también porque, por ser tan perfecto, como el hijo más modélico, «honra» a su creador, cuyo prestigio se ve a la vez realzado: varios constructores fueron convertidos en santos por sus extraordinarias habilidades constructivas y humanas. Dos ejemplos son san Juan de Ortega (✠ 1173) y santo Domingo de la Calzada (✠ 1109) (Celestino Espinosa, 1879). Este último sigue siendo el patrón de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

El puente de fábrica es un ejemplo a seguir.

Puente de Zulema: «¡Cuántas reflexiones filosóficas ocurren al contemplar ese puente, **custodio fiel e infatigable de las ideas que hombres** de otras generaciones **depositaron en él**! Cuántos **sentimientos de admiración y respeto se levantan** a la vista de ese pedazo de materia, **mago poderoso** que nos lleva de la mano a presenciar necesidades de remotas épocas, a oír los razonamientos con que aquellos hombres las midieron, y a conocer el verdadero espíritu de sus medios de contrarrestarlas!» (Herrera y Bonilla, 1869).

Puente sobre el río Ebro (*Logroño*): «Una gran avenida [en 1871] bastó para evidenciar la decrepitud y **anular los respetos que hasta entonces había inspirado** esa vetusta construcción» (Martín Gil, 1897).

Anamnesis y terapia

En medicina, la anamnesis es el conjunto de los datos clínicos relevantes y otros del historial de un paciente. Aparte de los agresores naturales y artificiales, las mayores desgracias para el puente son las enfermedades y los accidentes. Como víctima de aquellos, es decir, como *paciente*, para el puente es fundamental que cuente con un ingeniero-médico altamente especializado que haga una anamnesis completa de síntomas y diagnosis para el correcto reconocimiento y análisis de las patologías y para la posterior aplicación de terapias adecuadas para su curación. Asimismo, debe incluir el seguimiento del paciente, es decir las inspecciones periódicas para el adecuado mantenimiento del puente.

El puente de fábrica es el paciente. el constructor o el restaurador es su médico especialista.

Puente de Córdoba: «La piedra conchífera deleznable de que está construido este puente, hace **se encuentre sumamente deteriorado**, y en 1853 **se hizo un reconocimiento, viendo ser muy malo el estado de los arcos 2.º al 7.º** inclusive, […] **se reconoció estar fundado el puente sobre terreno de acarreo** que cubre la capa de arcilla que forma el lecho del río…» (Celestino Espinosa, 1878).

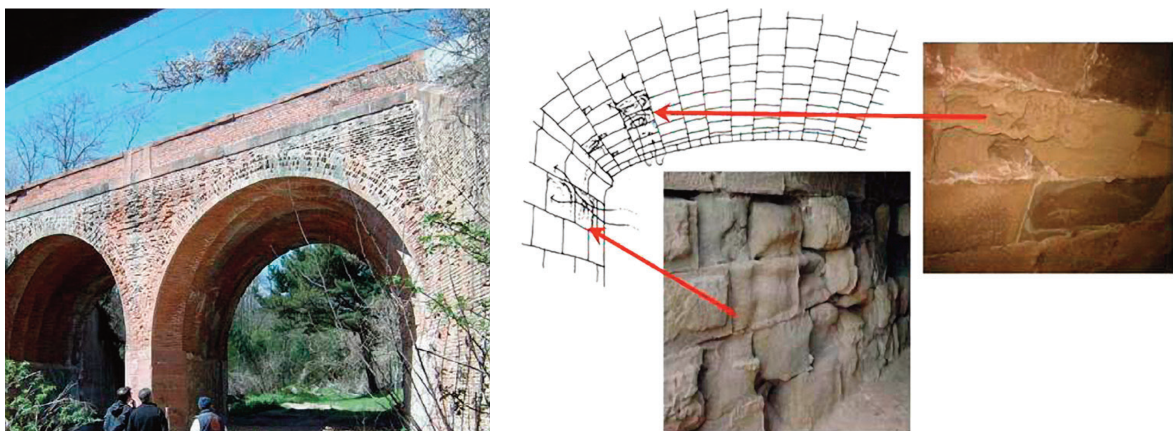


FIG. 5 «Poder ver», «saber ver» y «saber lo que se quiere ver» (puente de Sant Celoni). *Inspección y diagnosis de puentes ferroviarios*, ADIF, 2008. Fotografía de Javier León.



FIG. 6 El antes y el después de una restauración-rehabilitación (puente de Ponteceso). Fotografía de Javier León.

Puente sobre el Ebro (Logroño): «El hundimiento de una de las pilas viejas [...] sirvió **para practicar minuciosos y repetidos reconocimientos**, a fin de **apreciar con las mayores garantías posibles el grado de solidez** que podían ofrecer los cimientos de la obra antigua...» (Martín Gil, 1897).

Puente p. k. 348/750: «La Red Nacional de Ferrocarriles Españoles realiza anualmente campañas dirigidas a **la auscultación de los puentes** [...] **de fábrica** de su red [...] cuáles son **las causas más probables** que han producido **la patología del puente**, así como cuál es **la importancia de ésta** tanto en su **comportamiento estructural**, como en **su durabilidad**» (CEDEX, 1988).

Consejos de gestión adecuada en el tratamiento del puente de fábrica: «[El] especialista tiene que "poder ver" (disponer de medios de acceso e inspección […]), "saber ver" (en alusión a la cualificación de los inspectores) y, por último, "saber lo que se quiere ver" (preparar la inspección, estudiar el proyecto y conocer la historia clínica de la estructura objeto de visita). […Los pasos a seguir consisten en] la aplicación de la terapia propuesta en el proyecto, que requiere, naturalmente, de cirujanos competentes, [… como] la fase de "post-operatorio" y convalecencia, cuando es preciso seguir la evolución del paciente con la oportuna auscultación y el puntual seguimiento de la bondad del diagnóstico, de la medida terapéutica elegida y de cómo se ejecutó ésta. Tradicionalmente, esta fase ha venido siendo ignorada y, sin embargo, es fácil entender que debería verse incardinada en el sistema general de gestión» (León, 2005, 2008) [FIGS. 5 y 6].

La jubilación (a su debido tiempo o forzosa) [FIG. 7]

Una jubilación *digna*, es decir, con reconocimiento del largo y buen servicio prestado, se solía conceder al puente de fábrica (en contra de la práctica actual). Es más, una vez jubilado solía ganar en admiración y prestigio, lo que se manifestaba cuando se trataba de determinar el sitio adecuado de su sucesor: era fundamental respetar una distancia prudente entre el viejo puente y la ubicación del nuevo, para que no se estorbaran entre sí y para que la vista de su imagen no estuviera condicionada por elementos molestos. Pero, a veces, su jubilación se convertía en forzosa y dolorosa (jubilación anticipada o despe-



FIG. 7 Buen ejemplo de jubilación parcial (cambio de servicio) del puente de Mérida. Fotografía de Pedro M. Martínez Corada. © Creative Commons.

dida) cuando, por ejemplo, los nuevos tiempos así lo requerían y se producían sobrecargas o trazados a los que el puente no se podía adaptar o, sencillamente por la falta de sensibilidad de algún que otro constructor.

El puente de fábrica se jubila (o es jubilado).

Puente sobre el Tajo: «**Precioso puente de verdad**; pero que resultaba ya de **resistencia insuficiente** en sumo grado (y no quiero decir a lo que estaban **trabajando algunas de sus barras**) para los pesos de las máquinas, crecientes todavía entonces, que habían de circular sobre él. [...] Así las cosas, **forzoso era el sustituir tal puente**, para lo que estudié **las tres soluciones**: **refuerzo del puente viejo, nuevo puente metálico (de arco, por supuesto) y puente de fábrica**» (Del Pino, 1969).

Con relación a la construcción de variantes: «[...] en el proyecto de la variante y el nuevo puente debe tenerse muy en cuenta **la afectación al puente que se sustituye y el estado en que va a quedar**. [...] se plantean dos problemas fundamentales: 1. [...] la posición relativa entre los dos puentes: con demasiada frecuencia **el nuevo se ha situado casi pegado al viejo, de forma que ambos se estorban y ahogan**. [...] debe tenerse muy en cuenta este problema porque **pueden desgraciarse los dos puentes, o potenciarse mutuamente** si están a la distancia adecuada. 2. [...] **la situación en que queda el puente histórico**, porque **al perder su función deja de pertenecer a las Obras Públicas o a cualquier otro organismo**, y por ello **se va deshaciendo progresivamente hasta desaparecer**. Es necesario **tratar de mantenerlo vivo** con algún tipo de tráfico secundario, o creando un área de parada, o cualquier otra posibilidad, **para evitar el abandono**» (Fernández Troyano y Manterola, 1991).



FIG. 8 Desaparición de muros y arcos del puente de Guadarranque (Badajoz). Fotografía de Francisco José Negrete.

La muerte natural o violenta [FIG. 8]

Según las definiciones del DRAE, la muerte significa la cesación o término de la vida; puede suceder a causa de violencia, equivaler a destrucción, aniquilamiento o ruina, o producirse de forma natural, atribuida a la vejez. Todas estas causas son igualmente responsables de la muerte o ruina del puente de piedra, sin embargo, incluso «cuando llega la fase “terminal”, la de la muerte y autopsia o demolición y deconstrucción, a causa de “un colapso […] o cuando el destino impone”, como en la práctica médica de todos los tiempos, “cabe introducir aspectos tan importantes como los del aprendizaje (la “autopsia” […]) o los de la reutilización [el transplante], en sintonía con lo sostenible» (León, 2005, 2007).

El puente de fábrica es mortal.

Caída del antiguo puente de Pont-de-l’Arche: «Hacia la una de la tarde y sin que ocurriera **nada que pudiese hacer presentir este accidente** [...] el tajamar de arriba de la pila derecha del arco […] **se desprendió** de pronto y **cayó con estrépito** en el río… [y] a las siete y cuarto de la misma tarde, [la] pila [núm. 11] y la totalidad del arco **se destruyeron** hacia la parte de arriba, **siguiéndoles en este movimiento** la pila y el arco núm. 10, **llevándose de un golpe** toda la calzada del arco núm. 9. Los nuevos arcos [...] **no se movieron**, y el resto de los antiguos [...] **quedaron en pie** [...], la mitad de los arcos 7 y 8 […] **se separaron, cayendo** igualmente hacia la parte de arriba […], el antiguo puente de Pont de l’Arche, al cual se atribuyen cerca de diez siglos de existencia, **no debía perecer** mas que por los cimientos y socavaciones» (*Revista de Obras Públicas*, 1857).

Los herederos y la herencia (del puente o algunos de sus elementos):

Aparte de la herencia histórica singular que para nosotros encarnan los puentes de piedra aun presentes, si dejan de existir, en muchos casos pueden y deben aprovecharse sus partes vitales intactas –cual transplante humano– para sus puentes-compañeros enfermos.

El puente tiene herederos y deja herencia.

Puente de Zulema: «...en el ojo tercero **han precedido al arco actual otros arcos** [...]. **Igual condición se impuso al arco actual del ojo noveno**: [...] **se le obligó a reconstruir a su predecesor**» (Herrera y Bonilla, 1869).

CONCLUSIONES

Desde que Vitruvio recordara y prescribiera la sinergia de los campos técnicos y humanistas para llegar a la excelencia de la profesión, esta interdisciplinariedad forma parte indisoluble de la realidad práctica de arquitectos e ingenieros.

Esta encomienda se basa, en última instancia, en los resultados deducidos de la progresión natural del hombre pensante quien, a través de su capacidad de percepción y observación, aplica y amplía sus conocimientos y experiencias anteriores al ritmo que aumentan su inherente afán de saber y las necesidades materiales e inmateriales en la interacción con su entorno. Estos procesos cognitivos le conducen a categorizar y conceptualizar, asimismo, lo abstracto mediante la asimilación y la comparación con lo concreto, mecanismos que se hacen extensivos a la denominación de objetos y la articulación de pensamientos, por lo que nace la metáfora y la necesidad expresiva fundamental de aplicarla y emplearla en cualquier contexto.

Desde que los lingüistas Lakoff y Johnson (1980) fijaran el marco teórico del principio metafórico, se hace patente la estructura latente de la metáfora conceptual, practicada por el hombre pensante desde hace siglos: la proyección metafórica de un campo conceptual da origen a otro campo conceptual meta diferente, donde aquel concepto se construye y articula, parcial o completamente, en términos conceptuales del primero, y su prolongación terminológica. A raíz de este descubrimiento, se explica el mecanismo subyacente de la capacidad deductiva humana, movilizando todos los recursos conceptual-lingüísticos a su alcance, y por qué el hombre, para construir, se servía de las partes de su propio cuerpo y de elementos habituales de su vida cotidiana y los denominaba analógicamente: pie, pulgada, ojo, arco, flecha…

Por la extraordinaria identificación de los constructores y técnicos especialistas con los puentes de piedra, así como para sus posteriores cuidadores en el profundo respeto por este arte de construir y la necesidad de mantenerlo, esta proyección se sistematiza y se extiende a las correspondencias metafórico-terminológicas hasta completar el ciclo vital humano del puente, incluyendo circunstancias, estadios y comportamientos relativos a las distintas etapas de la vida de ambos.

En consecuencia, por la constancia y tenacidad en la proyección metafórico-terminológica del campo del hombre (fuente) al campo del puente de piedra (meta), se constata el uso continuado y metódico de la metáfora «EL PUENTE DE PIEDRA ES UN SER HUMANO», cuya relevancia terminológica antropo-médica se verifica en los múltiples ejemplos prácticos, extraídos del corpus de textos técnicos especializados sobre puentes de piedra, lo que demuestra que es la herramienta lingüística *habitual* de los técnicos especialistas en puentes de piedra para construir su obra, intervenir en su reparación, refuerzo y mantenimiento, así como para describir y explicar su ciclo vital.

Asimismo, por la necesidad de establecer criterios para la conservación de estos puentes, así como para la ampliación del aún pequeño grupo de especialistas, con este artículo se pretende contribuir, igualmente, al redescubrimiento –y, por ende, re-aprendizaje de los antiguos métodos constructivos– de la terminología metafórica *propia* de estos milenarios puentes, siendo la unión de ambos imprescindible para su supervivencia.

BIBLIOGRAFÍA

BAUDER, E. (2007), *Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora.* Tesis doctoral. Madrid, autoedición.

«Caída del antiguo puente de Pont-de l'Arche», *Revista de Obras Públicas,* n° 5, 1857, pp. 16-17.

CEDEX (Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales), *Auscultación de puentes de hormigón y de fábrica*, Madrid, Informe parcial para RENFE, Campaña 1988.

CELESTINO ESPINOSA, P. (1878 y 1879) , «Reseña de varios puentes construidos en España desde la antigüedad hasta principios del siglo XIX», *Revista de Obras Públicas,* nº 26, 1878, pp. 250-255, y n° 27, 1879, pp. 52-58.

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J. A. (1989), «El puente», *Cuadernos de San Benito, 1.* Primer Seminario Internacional Puente de Alcántara. Madrid, pp. 87-88.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. y MANTEROLA ARMISÉN, J. (1991), «Actuaciones en puentes históricos», en *Obras Públicas,* publicación monográfica extraordinaria: *Puentes I*, Barcelona, Colegio de Ingenieros, pp. 46-57.

FRAILE CUÉLLAR, J. M. (2011), «Díez decálogos sobre puentes», *Cimbra*, nº 4, pp. 26-35.

HEINRICH, B. (1983), *Brücken: Vom Balken zum Bogen* en *Kulturgeschichte der Naturwissenschaften und der Technik*, Hamburgo, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH.

HERRERA Y BONILLA, A. (1869), «Puente de Zulema sobre el Henares, en Alcalá», *Revista de Obras Públicas,* n° 17, pp. 250-264.

IBARRETA FERRER, A. (1876), «Proyecto de reconstrucción del puente de Isabel II en Bilbao», *Revista de Obras Públicas,* n° 24, pp. 221-224.

LAKOFF, G. y JOHNSON, M. (1980), *Metaphors we live by*, Chicago y Londres, The University of Chicago Press.

LEÓN, J. y BAUDER, E. (1999), *La construcción de un puente en el siglo XVIII. El puente de Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet / Der Bau einer Brücke im 18. Jahrhundert. Die Brücke von Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Fundación Agustín de Betancourt.

LEÓN, J. (2002), *Planteamiento del análisis estructural de construcciones de fábrica.* Libro de apuntes para la asignatura de Doctorado «Análisis estructural de construcciones históricas de fábrica» de la ETS de Ingenieros de CC y P. Madrid, Dpto. de Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras (eds.).

LEÓN, J. (2005), «Reflexiones en torno a la inspección de puentes», en *Jornadas sobre la vida de los puentes*, Madrid, Asociación Española de la Carretera (ed.), pp. 679-708. Donostia-San Sebastián, 27-29 de abril de 2005.

LEÓN, J. (2007), «Ingeniería de Mantenimiento de Puentes», en *Innovación en el diseño, construcción y conservación de puentes.* 4ª Conferencia anual monográfica de IIR España, pp. 1-57.

LEÓN, J. *et al*. (2008), «Inspection and evaluation of existing structures: a task for brave engineers», en F. BIONDINI y D.M. FRANGOPOL (eds.), *Life-Cycle Civil Engineering: Proceedings of the International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE '08)*, Londres, Taylor & Francis Group, pp. 355-360.

MACHIMBARRENA GOGORZA, V. (1927), «Puentes sobre el Tajo: Provincia de Toledo desde Puente del Arzobispo a Talavera de la Reina», *Revista de Obras Públicas,* n° 75, pp. 106-107.

MANTEROLA ARMISÉN, J. (1997), «Diálogo Incompleto sobre el Puente, la Cultura, etc.», *Carreteras,* número extraordinario: *Carreteras y Cultura*, pp. 63-79.

MARTÍN-CARO, J. (2001), *Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación*. Tesis doctoral dirigida por J. León, Madrid, ETSICCP-UPM.

MARTÍN GIL, V. (1897), «Puente de fábrica sobre el Ebro, en Logroño», *Revista de Obras Públicas,* n° 44, pp. 301-302.

DEL PINO DEL PINO, F. (1969), «"Réquiem" por un puente», *Revista de Obras Públicas,* n° 116, pp. 527-530.

RIAÑO CALLEJA, M. (1858), «Arquitectura práctica de los puentes y viaductos de fábrica», *Revista de Obras Públicas,* n° 6, pp. 45-47.

RUI-WAMBA, J. (1998), *Aforismos Estructurales. Structural Aphorisms*, Madrid, Fundación Esteyco.

STEINMAN, D. B. y WATSON, S. R. (1984), *Puentes y sus constructores*. Trad. por Miguel Aguiló Alonso. Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Ediciones Turner.

VITRUVIO, M. L. (1985), *Los diez libros de Arquitectura* en *Obras maestras*. Traducción del latín, prólogo y notas por A. Blánquez. Barcelona, Imprenta Juvenil, S.A.

Volver al índice

3

Archivos y centros documentales. Historia de los puentes de piedra

DOLORES ROMERO MUÑOZ
Historiadora
Directora de Programa CEHOPU-CEDEX

El estudio de los puentes como puntos singulares en las redes de comunicación de carreteras y ferrocarriles o como elementos fundamentales del paisaje urbano, en algunos casos incluso con una alta carga simbólica e icónica, ha adquirido especial relevancia en los últimos años en la actividad del Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo del CEDEX.

Con este motivo, en 2012 se organizó e inauguró la exposición *Puentes arco en España*, continuada con la muestra presentada al público el 9 de febrero de 2016 en la Sala de las Arquerías del Ministerio de Fomento con el título *Más allá del arco. Puentes de la Modernidad*. En ambas se utilizaron imágenes de los planos de los proyectos originales o de reparación, fotografías antiguas y grabados. Asimismo, se mostraron maquetas pertenecientes a la *Colección de maquetas del CEDEX* previamente restauradas o modernizadas. Para la segunda exposición dedicada a los puentes rectos levantados a partir del siglo XIX con la incorporación de nuevos materiales, hierro y hormigón armado, se fabricaron dos nuevos modelos, uno de carácter urbano con los viaductos «Madrid» y «Pontevedra» insertados en la trama de la población de Redondela. Y otro, con el acueducto de Alloz, una de las primeras obras en hormigón pretensado de Eduardo Torroja, para salvar el valle del mismo nombre en Navarra.

A estos trabajos de difusión se une la actividad desplegada por CEHOPU, junto con otros centros del CEDEX, encaminada al estudio de los puentes históricos camineros y ferroviarios propiedad del Estado. Estudios realizados en el marco de los convenios de colaboración firmados con la Dirección General de Carreteras y con ADIF, realizados a partir de la localización de la documentación de carácter histórico depositada en diversos archivos españoles.

El estudio de las obras públicas y del urbanismo en los archivos españoles, tanto de titularidad estatal como privada, entraña una cierta complejidad pues en general los fondos no se encuentran distribuidos con criterios fácilmente comprensibles para el profano. Ello por razón de la evolución histórica de las instituciones y por el origen y destino que a lo largo del tiempo han tenido estos documentos referidos al gobierno y gestión de esta materia debido a las sucesivas reorganizaciones administrativas.

Para entender mejor la casuística no debemos olvidar los factores históricos en la organización y realización de las obras públicas en España y de sus proyectos. Durante la Edad Media y Moderna aquellas eran promovidas por los reyes a través de Consejos y Secretarías, autoridades locales o particulares, corriendo a cargo de profesionales de diversa procedencia: albañiles o alarifes, maestros canteros o carpinteros, frailes y militares, arquitectos e ingenieros. Durante el Antiguo Régimen, con independencia de la autoridad o jurisdicción, la decisión de levantar un puente y dónde erigirlo, pasaba siempre por el Consejo de Castilla o de Estado, para lo cual se requerían las trazas, memoria y presupuesto a las instituciones promotoras con el fin de estudiarlo y, sobre todo, aprobarlo.

Las necesidades de gobierno de una monarquía como la española, con amplios territorios, llevó a la creación de una estructura organizativa polisinodial con el fin de administrar los asuntos de estado desde la corte instalada en Madrid. Esto motivó la circulación de una ingente cantidad de documentos desde la periferia hacia el núcleo de poder donde consejeros y ministros tomaban decisiones de carácter político y económico, incluyendo los asuntos sobre la construcción de obras públicas. A lo largo de los siglos esta acción de gobierno en el ámbito hispánico dio lugar a la formación de unas inmensas colecciones depositadas en los archivos españoles, convertidos estos en un referente obligado para los estudiosos de todo el mundo gracias a un inmenso patrimonio documental heredado del pasado.

En lo concerniente al estudio de los puentes de piedra y ladrillo de carácter histórico en los archivos españoles conviene tener en cuenta el origen de sus fondos:

1º- Archivos anteriores al siglo XVIII. En ellos se recogen los fondos de gobierno de las instituciones de la Edad Moderna.

Archivo General de Simancas
Archivo de la Corona de Aragón
Archivo de la Real Chancillería de Valladolid

2º- Archivos creados en el siglo XVIII. Con función específica de carácter civil y militar. Por Orden de 1768 se estableció la realización de tres copias de cada proyecto de puentes, para ser distribuidas entre los diversos órganos de gobierno.

Archivo General de Indias
Biblioteca Nacional de España
Biblioteca y Archivo del Palacio Real
Biblioteca Central Militar de Madrid
Biblioteca de la Academia de Ingenieros Militares de Hoyo de Manzanares, Madrid

Biblioteca de la Academia de Artillería de Segovia
Biblioteca Militar de Sevilla
Centro Geográfico del Ejército
Instituto de Historia y Cultura Militar
Real Academia de Bellas Artes de San Fernando

3º- Archivos y centros creados en los siglos XIX y XX relativos a la nueva organización ministerial y departamental, propia de estos siglos.

Archivo de la Armada, Palacio del Viso del Marqués, Ciudad Real
Archivo Histórico Nacional
Archivo General de la Administración
Archivo y Museo Naval de Madrid
Archivos Históricos Provinciales
Archivo del Ministerio de Fomento
Archivo y Biblioteca de la Fundación de Ferrocarriles Españoles
Biblioteca de la Escuela de Arquitectura de Madrid
Biblioteca de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Madrid
Instituto de Patrimonio Histórico Español

A MODO DE EJEMPLO. PLANOS Y MEMORIAS DE PUENTES DE PIEDRA. UNA EXPERIENCIA COMPARTIDA

Como se ha dicho en este breve texto, con motivo de los convenios firmados con la Dirección General de Carreteras y ADIF, el CEHOPU ha llevado a cabo una intensa labor de investigación histórica en los archivos españoles, tanto en los dependientes de la administración general del Estado, como en los de carácter regional y local. Una labor que ha dado magníficos resultados dada la abundante documentación localizada volcada en unos informes históricos adjuntos a los de carácter técnico.

A partir de esto, vamos a destacar algunos aspectos del trabajo de los artífices constructores de puentes a partir de sus trazas y memorias a través de los estudios realizados hasta ahora para la elaboración de los informes realizados con motivo del convenio de colaboración entre la Dirección General de Carreteras y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Uno de los aspectos a tener en cuenta en estos informes es la relación de los puentes con la articulación del territorio, vistos como los nudos fundamentales de las comunicaciones. En algunos planos de carácter territorial, desde el siglo XVI, se utilizaba un signo convencional para marcar los puentes como se puede ver en los mapas de los términos de Lillo del Bierzo, Otero de Naraguantes o Fabero depositados en el Archivo de la Real Chancillería de Valladolid. Otros en cambio tuvieron relevancia como elementos urbanos para salvar vados sobre ríos o caminos. Este fue el caso de Aranda de Duero con su puente de piedra, visto en un dibujo destacado del siglo XVI depositado en el Archivo General de Simancas.



FIG. 1 Mapa de los términos de Puebla de Lillo, Cofiñal, Redipollos y otros (León), 1638. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo de la Real Chancillería de Valladolid, Planos y Dibujos desglosados, 382.

Uno de los primeros puentes estudiados a cuenta del Convenio de Carreteras fue el de Aranda, una de las poblaciones a las que el Duero cede su nombre. Al tratarse de un enclave de origen medieval, ligado a la repoblación de Castilla, la investigación se dirigió al Archivo de la Real Chancillería de Valladolid y con posterioridad al de Simancas. Aquí se localizó uno de los planos más representativos del siglo XVI. Una imagen propia de la época, con evidentes distorsiones o simplificaciones del entramado urbano a «vuelo de pájaro», sobre la cual llama la atención el primitivismo de sus puertas dibujadas tumbadas. Según se aprecia, el dibujo buscaba hacer reconocible la villa en su mejor aspecto, aunque idealizada. Así se aprecia el trazado urbano ordenado con calles reconocibles, la plaza mayor con su iglesia en el centro mostrando unas dimensiones engañosas y su recinto amurallado cuya circularidad era casi perfecta. En la muralla se abría la monumental puerta referida, donde arrancaba el puente Mayor, cuyas pilas aparecen tendidas, mostrando sus tres arcos de medio punto reforzados por grandes estribos de sección cuadrangular, sirviendo los situados aguas arriba como tajamares de perfil triangular. En la imagen se aprecia asimismo el molino hidráulico ubicado aguas abajo con sus características ruedas movidas por la corriente.

Otro asentamiento singular en la región fue el de la villa de Tordesillas, también a orillas del Duero, emplazada en la actualidad en la carretera Nacional VI a su paso por la localidad del mismo nombre en la provincia de Valladolid. Esta autovía de alta capacidad sigue comunicando el noroeste con el centro de España pasando por poblaciones



FIG. 2 Plano de Aranda del Duero con su puente de piedra, siglo XVI. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, MPD, 10, 1.

como Aranda de Duero y Tordesillas, núcleos urbanos de gran relevancia desde la Edad Media en las conexiones entre la meseta y el norte periférico. En el caso de Tordesillas se tiene noticias de un puente enclavado en el mismo lugar desde el siglo X, que al parecer sufrió una profunda remodelación en el siglo XV promovida por los Reyes Católicos. Conviene destacar la relevancia de la localidad para la corona de Castilla, pues por decisión real en esta ciudad se firmó el Tratado del mismo nombre en virtud del cual se estipuló el reparto de las nuevas tierras descubiertas y por descubrir entre España y Portugal.

Las trazas conservadas del puente de Tordesillas proceden de las frecuentes reparaciones efectuadas entre los siglos XVI-XVIII, depositadas en el Archivo del Palacio Real. Conviene destacar en este caso el magnífico dibujo conservado en el Victoria & Albert Museum de Londres, de Anton van den Wyngaerde, fechado entre 1565-1570. Este forma parte de la obra encargada por Felipe II de las ciudades más destacadas de Castilla y en el caso de Tordesillas y su puente se trata de la primera representación de la villa. En el dibujo de Wyngaerde se puede ver en primer plano el puente tendido sobre el río Duero con sus siete bóvedas apuntadas, tajamares y espolones de ángulo agudo. En su



FIG. 3 Tordesillas por Anton van den Wyngaerde en 1565-1570. Victoria & Albert Museum, Londres.

calzada se levantaba una torre fortificada que servía para el cobro del pontazgo, sobre la cual las clarisas tenían los derechos de percepción, al menos, desde el reinado de Juan II, concesión sobre la cual existe abundante documentación. También eran suyas las obligaciones de reparación, como se encargó de recordar Fernando el Católico en una carta de 1514, y que seguramente hacía referencia a los destrozos que produjeron las crecidas del invierno de 1508 y 1509 en el camino que conducía a la aceñas instaladas bajo el penúltimo ojo de la margen izquierda del río Duero.

Otro caso singular es el puente de Almaraz, situado sobre el río Tajo a su paso por la provincia de Cáceres. Este puente constituyó un caso singular de las estructuras tendidas para orillar el río en una zona altamente estratégica, convertida Extremadura en frontera con el reino lusitano. Un lugar donde todavía hoy existen algunos de los más sobresalientes puentes existentes en España, como los romanos de Alcántara y Mérida, estudiados por el maestro de ingenieros Carlos Fernández Casado. En el caso de Almaraz, durante el año 2016 ha sido objeto de análisis en relación con el convenio citado, para lo cual se han llevado a cabo estudios de carácter técnico, comportamiento estructural, patología, resistencia o estado hidrológico, además del informe histórico.

Acerca de este puente escribiría José Antonio Fernández Ordóñez, pues lo consideraba una de las actuaciones más notables de la España de la época de los Austrias, comparable, aun con su factura clásica, a los erigidos en otras zonas de Europa donde se plasmaron las innovaciones constructivas del Renacimiento, como el puente de Rialto en Venecia. Aún hoy, su pétrea mole se yergue como un paso seguro en los enlaces entre Castilla y Extremadura, situado en el Parque Natural de Monfragüe a la altura de Plasencia. Su estructura consta de dos arcos de 32 y 38 metros de luz, convertida esta en una de las mayores bóvedas levantadas en la península hasta entonces. Las representaciones de diversas épocas muestran la recia pila central del puente ubicada en la zona media del cauce, dotada de un potente tajamar de planta triangular sobre el cual se sitúa un cilindro hasta el nivel de la rasante. Esta pila ordena todo el conjunto, configurada como un tambor coronado por el escudo del emperador Carlos V y una inscripción que nos indica el nombre de su artífice, el cantero Pedro de Uría así como la fecha de su finalización en 1537.

Del puente lamentablemente no se han encontrado planos en los archivos, si bien en este caso han sido de gran interés los incluidos en libros de viajes o en tratados muy posteriores a la época de su construcción. La excelencia de su fábrica fue celebrada por Antonio Ponz o por Miguel Sánchez Taramas en las adendas incorporadas a la traducción

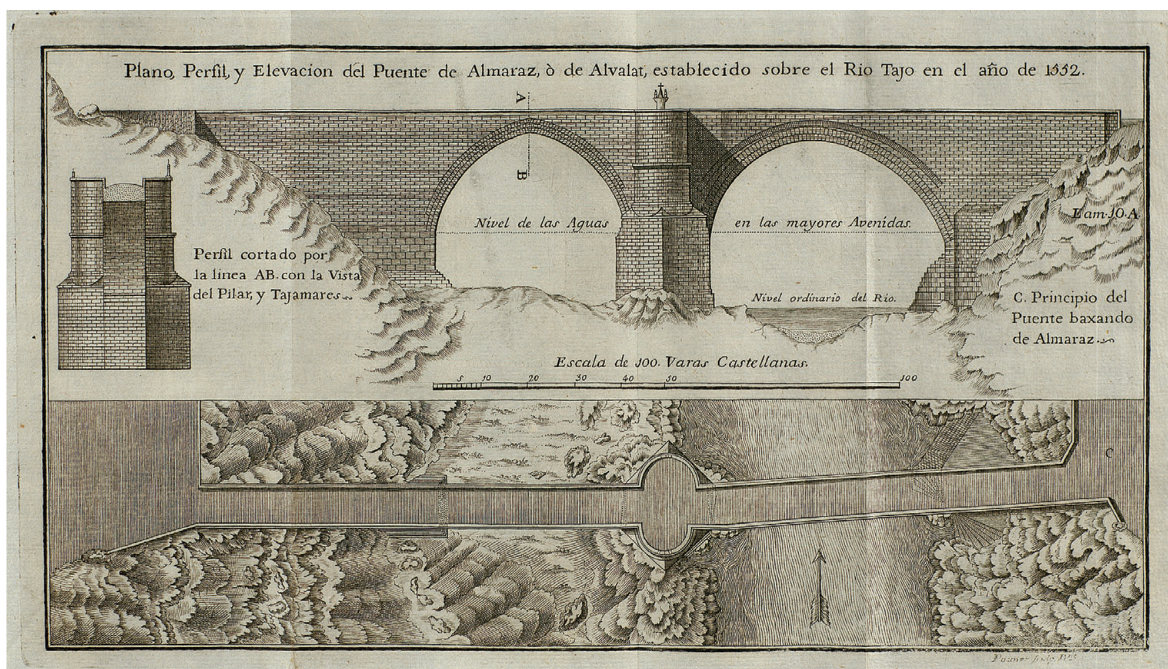


FIG. 4 Alzado y planta del puente de Almaraz aguas arriba, incluido en *Tratado de fortificación, ó Arte de construir los edificios militares, y civiles de Juan Muller, traducido en castellano, dividido en dos tomos y aumentado con notas ... por D. Miguel Sánchez Taramas*. Barcelona: por Thomas Piferrer, 1769.

del *Tratado de fortificación o arte de construir los edificios militares y civiles* de John Muller (1769), en cuya edición castellana el ingeniero militar español añadió algunas de las obras públicas más singulares del mundo hispánico tanto coetáneas como históricas. En este sentido, todavía se conservan en el Museo de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando los planos de una posible propuesta de restauración tras la voladura de uno de sus arcos durante la Guerra de la Independencia firmado por Manuel Ibáñez en 1846.

Siguiendo con los puentes de piedra estudiados en el Convenio con la DG de Carreteras, nos encontramos con otro puente de gran interés histórico como es el de Zuazo, ubicado en un lugar de alto valor estratégico y por ello muy bien documentado con abundantes planos y documentación depositados sobre todo en el Archivo General de Simancas. Ubicado en el p.k. 674 de la carretera Nacional IV (Madrid-Cádiz), en el término municipal de San Fernando (Cádiz), salva el caño de Sancti Petri en las cercanías del arsenal de La Carraca.

No se conoce con claridad su origen, aunque debió construirse en una época ciertamente antigua, pues los cronistas del pasado confundían su fábrica con las arquerías de un acueducto de época romana. En el siglo XVI la reforma del puente fue objeto de diversos proyectos, algunos firmados por ingenieros tan insignes como Benedeto de Rávena, Giacomo Pelearo «el Fratín» o Tiburzio Spannocchi, ingeniero real de Felipe II, a quien encargó un reconocimiento del puente en 1580. Este elaboró un extenso proyecto de gran interés incluyendo unos bellísimos dibujos en la Memoria encontrada en el Archivo General de Simancas. Asimismo el ingeniero se ocupó de su reparación y fortificación, siendo finalizadas las obras con la reconstrucción del arco mayor y principal a finales del quinientos. Como se puede apreciar en otros planos encontrados en Simancas la situación



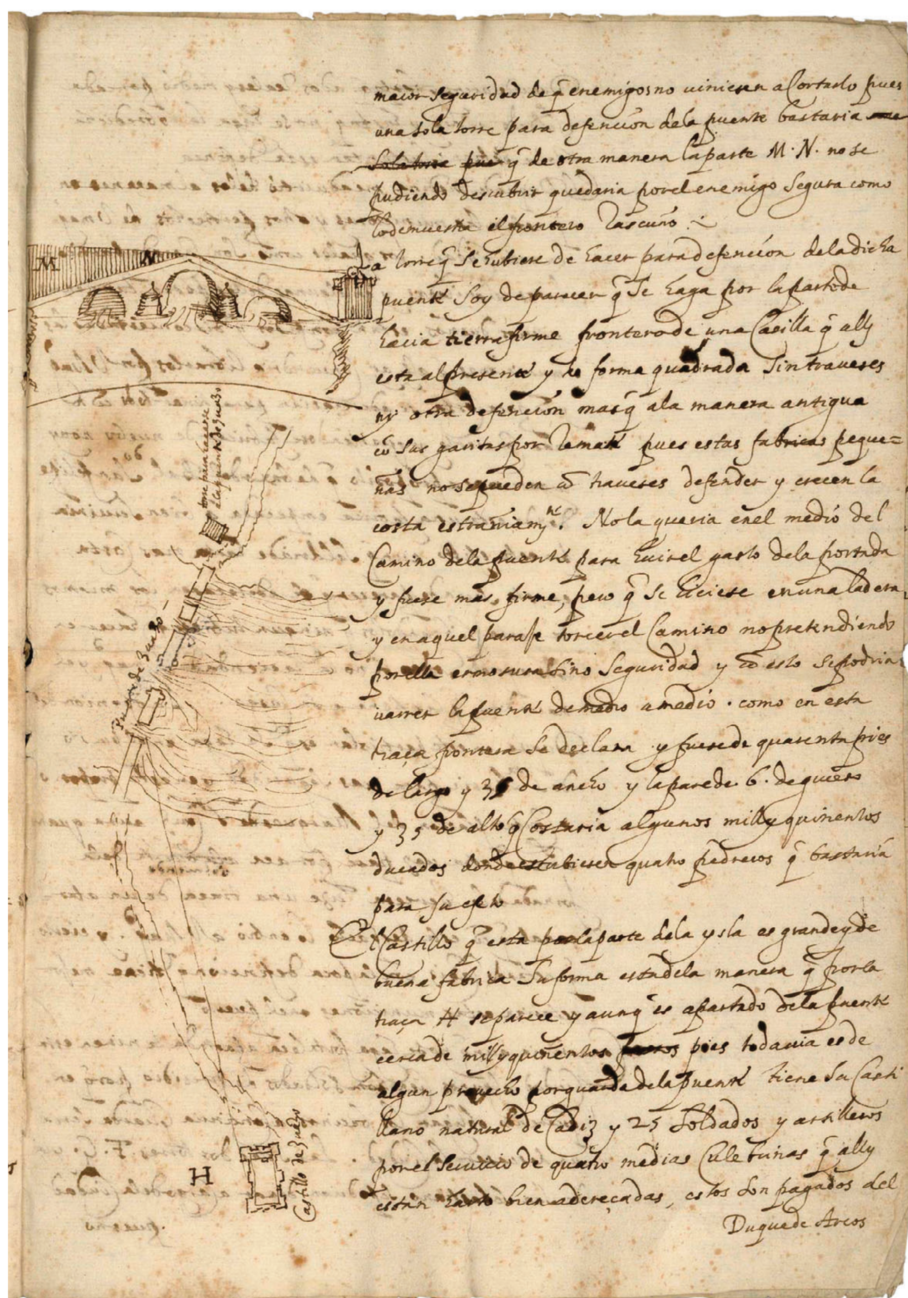


FIG. 5 [Plano y perfil del puente de Zuazo], Tiburzio Spannocchi, 1587. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, GA, 03352, 90.

trascendental del puente hizo que durante los siglos XVII y XVIII, sobre todo tras la toma de Gibraltar por los ingleses, fuese fuertemente fortificado mediante la adhesión de formas adelantadas, como baluartes, cortinas, caballeros, foso o baterías.

Convertido en plaza fuerte, en 1810, con el fin de ocupar el último núcleo de la resistencia hispánica instalada en la Isla de León y su puente, fue asaltado por las tropas napoleónicas, si bien el ejército español al mando de Diego de Alvear y Ponce de León, parapetado en la batería del Portazgo, que dio nombre a la batalla, pudo rechazar los ataques de las tropas francesas. Desde febrero de 1810 hasta agosto de 1812, el lugar se convirtió en el último reducto de la independencia española. Un hecho de gran trascendencia histórica pues en la localidad de San Fernando, muy cerca del puente, se proclamó la primera Constitución española.

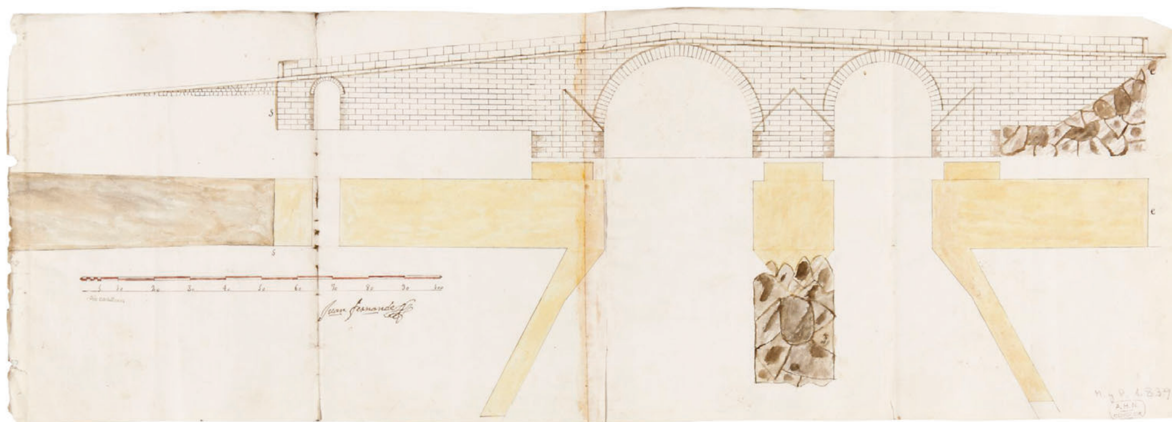


FIG. 6 Puente de Ramacastañas. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo Histórico Nacional, MPD 1839.

Otro caso singular, objeto de investigación, ha sido el puente sobre el río Tiétar en Arenas de San Pedro vinculado en este caso con las cañadas para la trashumancia de las ovejas castellanas. El valle del Tiétar constituye una comarca natural al sur de la sierra de Gredos habitada desde tiempos inmemoriales. Durante la época romana fue tendida allí la calzada romana y con posterioridad la cañada del puerto del Pico (Ávila), convertida en siglos posteriores en importante vía para enlazar Castilla con Extremadura. La Cañada Real aprovechaba el paso de la calzada desde León, donde tenía su origen, para a través de las provincias de Ávila y Toledo recalar en el extremo sur de la provincia de Badajoz. En las cercanías de Arenas de San Pedro se instaló una aduana en el puente de Ramacastañas, formando un sistema de conexiones en la región para el paso de los ganados ovinos de norte a sur.

A través de la documentación localizada en el Archivo Histórico Nacional y en el Archivo General de la Administración podemos conocer la historia del puente, su origen, evolución y las sucesivas reparaciones o reconstrucciones. Las primeras noticias del puente de Arenas de San Pedro se remontan a 1448, cuando existía allí una barca que explotaba el concejo. En 1498 el consejo Real, llamado después de Castilla, concedía permiso al Real y Honrado Concejo de la Mesta para construir allí un puente «a fin de que por él atraviesen los ganados que van a los extremos». Pero el cabildo de Arenas se opuso alegando haber elegido un lugar poco conveniente para erigir el puente, lejos del

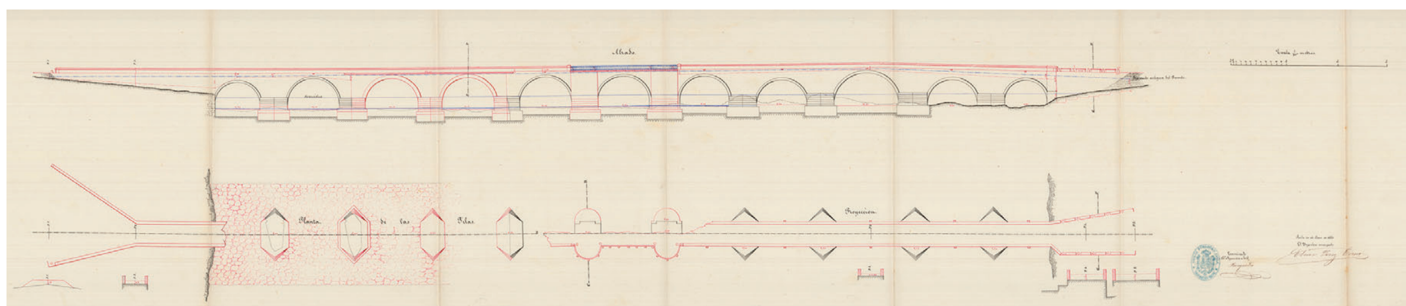
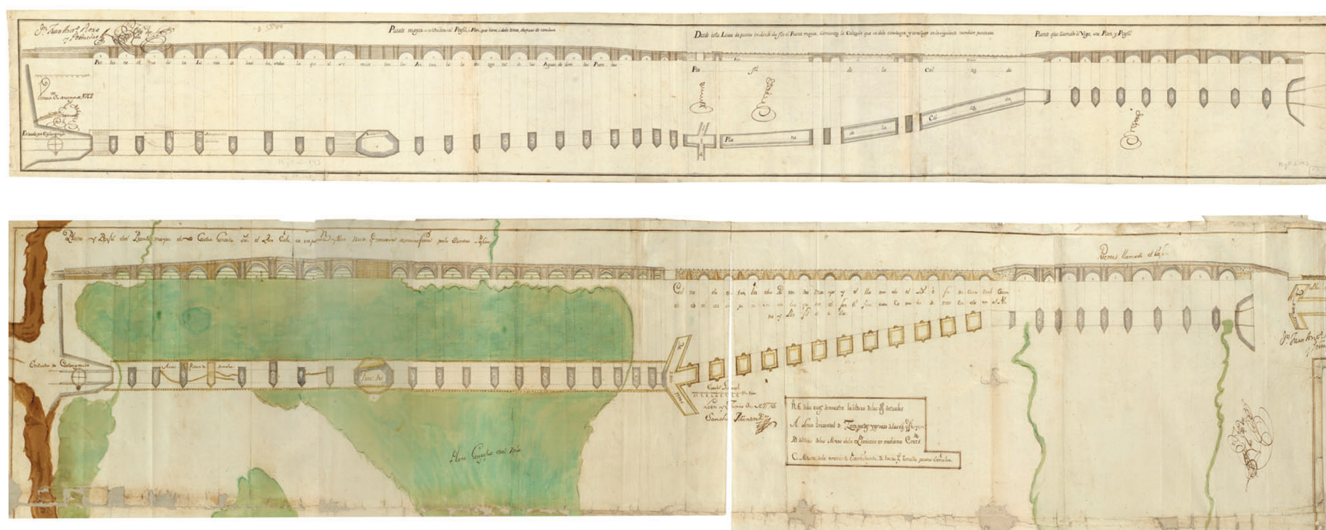


FIG. 7 Alzado y planta del puente sobre el río Tiétar en Arenas de San Pedro, en *Proyecto de reparación de Elías Pérez Cano*, 1875. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo General de la Administración, 24-05707-1.



FIGS. 8, 9a y b Plano y perfil del puente Mayor en Castrogonzalo, su reparación y obra nueva que necesita se manifiesta por la sombra, por Sánchez Menéndez, 1775. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo Histórico Nacional, MPD 2193.

camino de Andalucía que desde Madrid pasaba por Toledo. Finalmente, el puente fue levantado a cargo de la Mesta para el paso de los rebaños trashumantes de la Cañada Real Leonesa Occidental. Pronto se detectaron las deficiencias de la estructura construida, al quedar corto a falta de una bóveda, defecto que hacía intransitable el puente durante las crecidas del Tiétar. De sillería, sus tres arcos iniciales, los más próximos a la pedanía de Ramacastañas, con el tiempo aumentaron hasta los once actuales. Erigidos de medio punto, fueron reforzados con contrafuertes bajos y angulares en la parte antigua y cúbicos en la más moderna subiendo hasta el tablero, formando apeaderos a ambos lados de la calzada. Como se ha mencionado, gracias a los trabajos de reconstrucción del puente llevados a cabo en 1868 hoy podemos conocer el trazado original del puente merced a los planos depositados en el Archivo General de la Administración.

Con todo, el puente más interesante desde un punto de vista archivístico es el puente Mayor de Castrogonzalo, sobre el río Esla (Benavente, Zamora). Tendido este afluente del Duero que cruza de norte a sur las provincias zamorana y leonesa, el puente se sitúa en el p.k. 258+100 de la Nacional VI, carretera radial que enlaza Madrid con A Coruña. Desde época muy temprana Castrogonzalo fue paso obligado para la comunicación de la meseta con los puertos de Galicia y Asturias. Por esta razón ha sido desde siempre un enclave estratégico de primer orden pues por allí pasaba la Vía de la Plata y en paralelo la Cañada zamorana, convertido el enclave en lugar de ferias celebradas desde el siglo XIII.

Sin duda el estudio del puente a través de la diversa documentación de archivo, manifiesta una relevante singularidad de su historia y trazado, al tratarse de una estructura levantada a lo largo de los siglos, con formas constructivas y materiales propios de cada tiempo. En la actualidad la sillería medieval se imbrica con el hierro y el hormigón moderno, convirtiendo el puente en un mosaico de técnicas, materiales y recursos constructivos diversos. Hoy el puente cuenta con 24 arcos característicos de las diferencies épocas de su construcción.

Algunos autores han discurrido sobre un posible origen romano del puente, caído con el tiempo en el abandono. Esta circunstancia propició la construcción de otro posterior, paralelo al primero y a muy corta distancia. El original serviría de cantera a la nueva estructura erigida denominada en tiempos del rey Alfonso IX como puente de la Santa Marina. Según cuenta Madoz, en 1222 el rey castellano concedía al monasterio de Arbás la facultad de organizar ferias alrededor del puente de Santa Marina de Castrogonzalo.

Con posterioridad, a lo largo de los siglos se sucedieron distintos proyectos para reconstruir el puente «a la moderna». Uno de los primeros fue el trazado de los hermanos Juan y García de la Vega, expertos constructores de puentes, que iniciaron los trabajos en 1585. Con todo, la reparación y ampliación del puente para luchar contra las continuas avenidas se debió a los maestros canteros Juan de Nates y Felipe de la Cajiga. Tiempo después, en las primeras décadas del siglo XVIII el puente se encontraba en estado ruinoso, instalado un paso provisional de madera. Localizados los planos de la época en el Archivo Histórico Nacional, no sería hasta 1762 cuando se plantearía la reparación y prolongación del puente Viejo, levantando y sustituyendo las bóvedas necesarias con el fin de salvaguardar la estructura de las continuas corrientes e inundaciones.

El estado del puente en el siglo XIX nos lo revela Madoz cuando al explicar la importancia de este paso de la carretera Madrid-Galicia escribía: «Castrogonzalo tiene un puente de piedra de sillería de 27 ojos; hay, sin embargo, un trozo de 12 ojos que se construyó en 1806 para unir el puente viejo con el nuevo y en el primer trozo según se va para Benavente, hay cuatro ojos de madera en mal estado, que fueron de piedra como los demás, pero los volaron los ingleses y los franceses en la Guerra de la Independencia».

Ya en el siglo XX, las condiciones de conservación de un puente levantado en diferentes épocas obligaron a continuas reparaciones. En este sentido, de la documentación encontrada en el Archivo General de la Administración se han podido estudiar las reformas realizadas a partir de los diversos proyectos, el primero de los cuales se debió al del ingeniero Antonio Velao en 1910. En 1930 se sustituyó un tramo de fábrica por otro de hormigón y en 1932 se construyeron tres grupos de pontones de cuatro vanos cada uno para enlazar las dos partes del puente. Con todo, a mediados del siglo XX, entre 1953 y 1958, se proyectó en paralelo a este otro puente nuevo de hormigón a cargo del ingeniero V. Oñate Gil, actualmente en servicio en la autovía del Noroeste, junto al viaducto actual de la carretera ZA 308-13. Durante la construcción de este, el puente medieval sufrió la demolición de seis de sus vanos, con lo cual en 1962 se planteó la voladura completa de la estructura, aunque afortunadamente no se llevó a cabo debido a la presión mediática.

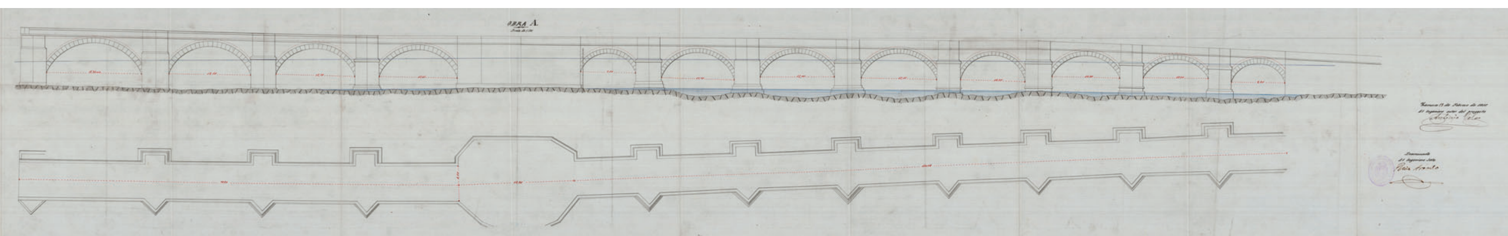


FIG. 10 Alzado del proyecto de consolidación del tramo del siglo XVIII del puente de Castrogonzalo, por el ingeniero Antonio Velao, 1910. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo General de la Administración, signatura 24/4921-1.



FIG. 11 Fotografía del puente de Castrogonzalo con arcos del siglos XVIII y del XIX. España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Archivo General de la Administración. Signatura 24/16844.

Entonces, el puente Viejo o Mayor se convirtió en peatonal, aunque, a pesar de ello, en el verano de 2016 algunas bóvedas cayeron al río dadas las malas condiciones de la estructura de piedra y la diferencia de comportamiento estructural de los diversos materiales utilizados, pues el derrumbe se produjo en los recalces de hormigón de las antiguas vigas de piedra.

Para finalizar este breve artículo, conviene reflexionar sobre la importancia de la investigación archivística en el estudio de los puentes históricos, sobre todo cuando la intención es intervenir en ellos ya sea para su remodelación o para su restauración. Los documentos históricos permiten conocer la estructura original de los puentes del pasado, así como las sucesivas reparaciones o añadidos que sufren habitualmente, una información clave a la hora de intervenir en ellos. Las reformas de los puentes han supuesto en muchos casos perpetrar modificaciones de gran calado como la incorporación de materiales nuevos, caso del puente Viejo de Castrogonzalo.

De hecho el uso de hierro y hormigón en puentes levantados en piedra o ladrillo o las ampliaciones de los tableros mediante la colocación de plataformas, por poner algunos ejemplos, han resultado en algunos casos desafortunadas. Por ello, cualquier intervención debe hacerse desde la comprensión de la obra y la sensibilidad y respeto hacia la misma, recurriendo a las trazas y memorias de carácter histórico.

Volver al índice

4
¿Antiguo o anticuado? El puente de Andújar a principios del siglo XIX

DANIEL CRESPO DELGADO
Dr. en Historia del Arte
Fundación Juanelo Turriano

Debo iniciar estas líneas haciendo referencia al proyecto de investigación promovido por la Fundación Juanelo Turriano cuyo objetivo es el estudio de la historia de la restauración y la conservación patrimonial de las obras públicas en España, desde el siglo XVI hasta 1936. Como es lógico y ya hemos subrayado en alguna otra ocasión, este trabajo no se ha centrado en cualquier actuación realizada en una construcción histórica de ingeniería civil, sino solo en aquellas que partiesen o tomasen en consideración el carácter patrimonial de la obra intervenida.

No es una tarea fácil porque supone trazar una historia de considerable enjundia por su extensión geográfica, temática y cronológica; además, es una historia inédita, todavía no contada. Por ello, cabía emprender una investigación que estuviese a la altura, que permitiese afrontar los desafíos con garantías. Más allá de la recopilación de la bibliografía histórica, incluyendo fuentes tan engorrosas de registrar pero a la vez tan iluminadoras como la prensa periódica, lo cierto es que el núcleo de esta investigación debía ser necesariamente la documentación de archivo. Conscientes de ello hemos consultado más de 30 archivos de muy diversa índole: de la administración central, local y regional, de comisiones de monumentos, academias, museos, etc. Calculamos que se han revisado entre 2.000 y 3.000 legajos. Son otros quienes deben juzgar los resultados del trabajo, pero creemos poder afirmar que no todos los días se acomete una investigación de esta envergadura.

Estos breves apuntes no versarán sobre dichas pesquisas, pero las citamos porque uno de nuestros objetivos es poner a disposición de los interesados el material documental, gráfico y bibliográfico que la Fundación Juanelo Turriano ha logrado recoger. Por lo tanto, resulta de interés dar a conocer este proyecto entre los potencialmente interesados. Durante el curso se ha puesto de manifiesto la infravaloración del patrimonio ingenieril



FIG. 1 Vista actual del puente de Andújar, Jaén.

respecto a otros más consolidados, reflexionándose sobre las posibles medidas que cabría tomar para paliar tales distancias. Otros ámbitos patrimoniales y la propia historia de la conservación monumental han puesto de relieve la importancia de emprender estudios sólidos y difundirlos con la mayor eficacia. La experiencia ha demostrado que se valora y se protege más y mejor aquello que se conoce más y mejor.

Pero iniciar estas líneas como lo hemos hecho, se debe fundamentalmente a que gran parte del material que utilizaremos para conformar nuestro discurso se ha encontrado en el marco de dicha investigación. El título ya desvela que pondremos el foco en el puente jienense de Andújar [FIG. 1], si bien este paso, al menos de manera directa, no tiene un lugar en la historia de la conservación patrimonial de la ingeniería civil. A simple vista, detectamos que nos encontramos ante un puente con un tramo seguramente correspondiente a la Alta Edad Moderna (finales del siglo XV y siglos XVI-XVII) y otro decimonónico. El tramo del XIX, formado por dos arcos escarzanos de 70 pies, es notable porque es el único subsistente que puede ligarse al considerado uno de los primeros ingenieros de caminos en España, José Agustín de Larramendi (1769-1848).

A pesar de su interés intrínseco, no resulta relevante, como apuntábamos, para la historia de la conservación de la ingeniería civil porque en esta actuación no se partió de la consideración patrimonial del puente de Andújar; más bien lo contrario. Sin embargo, esta intervención revela ciertos aspectos de interés de la definición de la ingeniería moderna y, en especial, de la relación de la ingeniería con el pasado y con los puentes de fábrica históricos. Podemos adelantar las conclusiones: no fue ni la primera ni la única fuente contemporánea, pero la propuesta de reparación del puente de Andújar a principios del siglo XIX es una de las primeras ocasiones donde se revela de manera bastante clara y además en un proyecto concreto, un fenómeno nuevo y decisivo. Se constata en este caso que la ingeniería tomó consciencia y generó un discurso sobre sí misma que ponderaba que ahora era capaz de producir infraestructuras absolutamente novedosas, que no solo superaban lo anterior (algo habitual en la retórica de una obra nueva) sino que lo hacían empalidecer al procurar prestaciones desconocidas. Se afirmó, por tanto, que se abría una nueva etapa, que se producía un corte con lo anterior que hacía deslizar lo antiguo, la obra del pasado, a la categoría de anticuado.

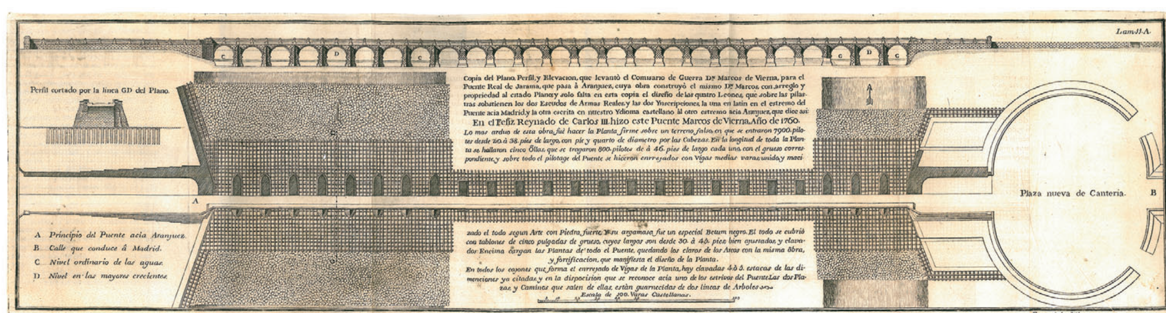


FIG. 2 Puente de Aranjuez, en el *Tratado de fortificación o arte de construir los edificios militares y civiles* de John Muller (1769).

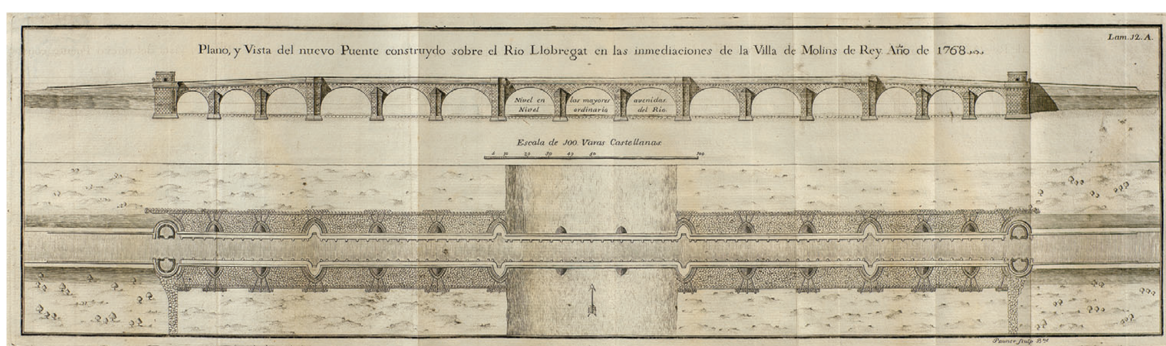


FIG. 3 Puente de Molins de Rei, en el *Tratado de fortificación o arte de construir los edificios militares y civiles* de John Muller (1769).

Nos detendremos primero en dos notables publicaciones de la ingeniería española, una de 1769 y otra de 1820, para constatar, a través de las diferencias entre ellas, la aparición de ciertas ideas que luego veremos concretadas en los proyectos sobre el puente de Andújar de la segunda década del siglo XIX.

El primer libro que trataremos es la edición española, a cargo de Miguel Sánchez Taramas, del *Tratado de fortificación o arte de construir los edificios militares y civiles* de John Muller, impreso en Barcelona en 1769. Entre las adiciones que el ingeniero militar Sánchez Taramas incluyó en dicho tratado, destacamos la que cabría considerar la primera historia de los puentes en español. Si no fuese porque es de sobra conocida la aportación de los ingenieros militares a la ingeniería civil a lo largo del siglo XVIII, podría sorprendernos un contenido de este tipo en un libro de un ingeniero militar destinado preferentemente a su centro de formación, la Academia de Barcelona. En todo caso, Sánchez Taramas describió y analizó en esta breve historia una serie de puentes de diversas épocas, incluyendo ilustraciones de algunos de ellos. Inició su relato con el puente de Martorell, que atribuyó a los cartagineses, continuó con los romanos, se detuvo en pasos renacentistas tan fabulosos como el de Almaraz y, lo más importante para nosotros, acabó haciendo referencia a los puentes contemporáneos de Aranjuez (Marcos de Vierna, 1757-1761) y al de Molins de Rei (Pedro Martín Cermeño, 1763-1767). Criticó la relación entre la luz de los arcos y las pilas en el puente de Aranjuez, elogiando en cambio la tan airosa proporción conseguida en el puente de Molins gracias a sus «arcos ovalados», obra, cabe destacarlo, de un prestigioso ingeniero militar como era Cermeño, que llegó a ocupar el puesto de ingeniero general [FIGS. 2 y 3].

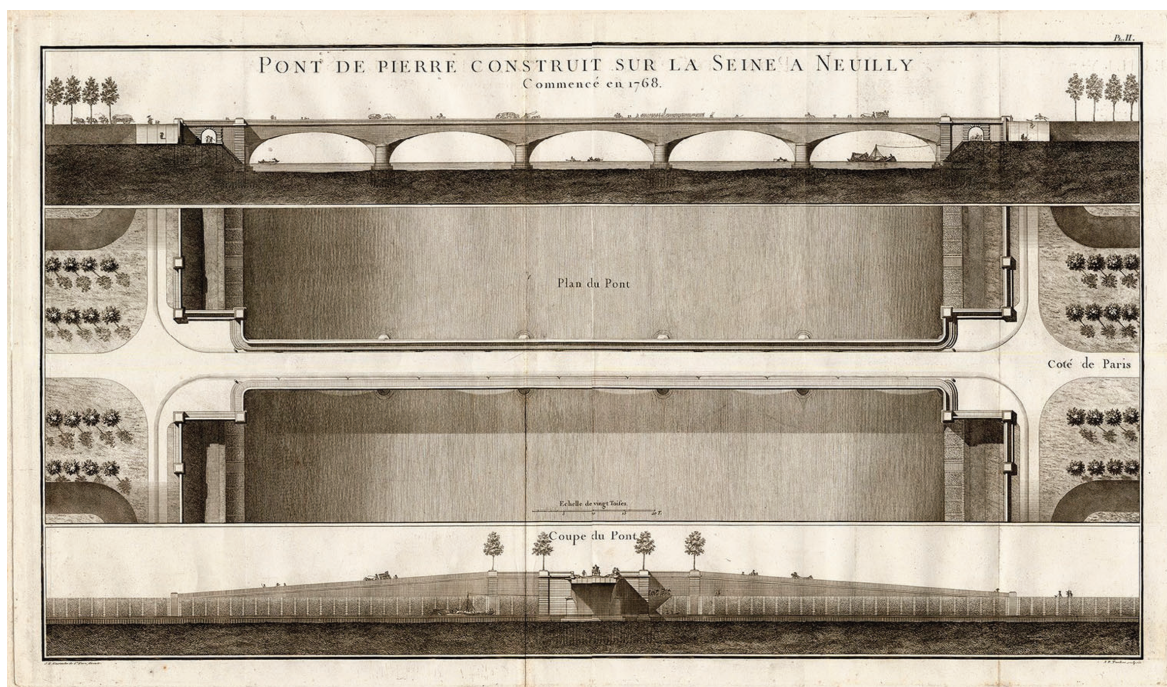


FIG. 4 JEAN-RODOLPHE PERRONET, *Pont de pierre construit sur la Seine à Neuilly. Commencé en 1768*, 1782.

> [los arcos del puente de Aranjuez] en número de 25, son solo de 30 pies de diámetro y los pilares de once de grueso [...] el puente de Molins [...] tiene 15 arcos, los nueve intermedios son iguales y de figura oval [...] el claro de cada uno de estos nueve arcos es de 69 pies [...].

Sánchez Taramas consideró que el puente de Molins era modélico y por ello detalló el método de su construcción. Por tanto, para Taramas, ciertas aportaciones coetáneas resultaban admirables, si bien en ningún momento rompió la línea de evolución de los puentes o hizo referencia a una fractura, al inicio de una renovada era.

Las cosas empezaban a ser algo distintas unos 50 años después. En 1820, una comisión facultativa encabezada por el ingeniero Larramendi redactó una copiosa *Memoria* para las Cortes proponiendo las medidas necesarias para mejorar las obras públicas. Se subrayó su relevancia para el desarrollo del país y se propuso contar con un cuerpo de ingenieros civiles bien formados y organizados, resucitando la autonomía del ramo de Caminos y reabriendo su escuela, que las tensiones políticas de las primeras décadas del siglo XIX se habían llevado por delante. Destaquemos que en esta *Memoria de la Comisión de Caminos y Canales sobre las comunicaciones generales de la Península* se reincidió en que en los últimos años la ciencia y la tecnología, la ingeniería en particular, habían protagonizado grandes avances, tantos que ciertas obras recientes y admiradas, ya resultaban caducas. Pusieron un ejemplo que, precisamente, volvía a sacar a la palestra el puente de Aranjuez de Vierna. En este caso, sin embargo, no se equiparó al de Molins sino a uno mucho más innovador aunque también contemporáneo: el de Neuilly sobre el Sena de Jean-Rodolphe Perronet [FIG. 4]. Según los comisionados, ya no se trataba de que el puente de Aranjuez presentase una solución inadecuada; recalcaron que las diferencias entre ambos pasos eran tan grandes hasta el punto de considerarlos propios de dos edades

o estados de civilización diversos. El de Aranjuez era anticuado, característico de una época inculta; el de Neuilly encarnaba la elevada ilustración de la nación y del tiempo en que fue erigido:

> El puente de Aranjuez es un mazacote pesado, que más bien parece construido para atajar la corriente de las aguas [...] el puente de Neuilly de Perronet es tal la elegancia y atrevida esbeltez, que sus arcos parecen alas que vuelan [...] El puente de Aranjuez parece obra de los tiempos más bárbaros e ignorantes; el de Neuilly es un monumento que hace ver el último grado de delicadeza y perfección a que puede llegar el arte de construcción entre las naciones más civilizadas.

Esta cita nos revela de igual modo que la obra de ingeniería moderna había pasado a considerarse un emblema del grado de desarrollo de un país. Que una gran infraestructura se presentase con esta retórica era habitual, pero ahora adquiría un matiz nuevo: ya no se predicaba de su magnificencia o riqueza (de hecho, el puente de Aranjuez era más largo y ostentoso que el de Neuilly) sino de la resolución técnica adoptada. Es decir, era la utilización de una técnica innovadora lo que resultaba admirable y significativo.

Al referirse la misma comisión en 1820 a una de las obras más respetadas de las décadas anteriores, el Canal de Aragón, –tanto que se editó uno de los libros más espectaculares de la época para celebrarlo, la *Descripción de los Canales Imperial de Aragón, y Tauste* (1796)–, escribió lo siguiente:

> Las esclusas [del canal] están perfectamente concluidas, sin embargo, ya no se hacen de forma ovalada [...] en la continuación del canal no se ve aquel progreso gradual de perfeccionamiento que se observa en otras naciones civilizadas [...] en materia de industria, construcciones y muchas otras cosas, lo que hoy se tiene por bueno dentro de algunos años es inadmisible por haber perfeccionado o inventado cosas mejores.

Parecía claro, por tanto, que al menos entre ciertos círculos se tomaba conciencia y se proclamaba que la ingeniería civil se encontraba inmersa en una profunda renovación, tanto que las soluciones admiradas ayer, ya podían resultar anticuadas.

Anotamos líneas atrás que estos argumentos los reencontramos en algunos de los proyectos de intervención en el puente de Andújar que se sucedieron en la segunda década del siglo XIX, justo cuando Larramendi y sus colaboradores redactaron su *Memoria*. No es este el lugar para desgranar el denso pasado del puente jienense, pero destaquemos su importancia caminera al situarse sobre el río Guadalquivir, en la carretera que unía la Meseta con el valle del Guadalquivir y la bahía gaditana. En el tercer cuarto del siglo XVIII, se reforzó su relevancia ya que gracias a las obras, precisamente, del paso del Tajo en Aranjuez y las celebérrimas de Sierra Morena, la vía que comunicaba la Corte con los puertos de Sevilla y Cádiz se desplazó hacia el este, convirtiendo a Andújar en un paso obligado. De hecho, hasta fechas recientes, hasta la construcción de la variante de Andújar en la autovía actual, el puente formaba parte de la carretera Nacional IV.

Siguiendo la descripción que realizara Carlos Fernández Casado, el puente de Andújar consta de tres tramos. El primero lo conforma un muro de acompañamiento con cuatro



FIG. 5 Vista actual del puente de Andújar donde se aprecian los dos arcos escarzanos del tercer tramo y uno de los ocho arcos de medio punto del tramo central.

medios puntos y cuatro ojos de buey para facilitar el desagüe. Luego el tramo central con ocho arcos de medio punto de luces variables (entre 9,55 y 11,90 metros), seis arquillos de aligeramiento y pilas muy anchas con tajamares triangulares. A continuación de un pilar donde se situaba antiguamente un torreón de carácter defensivo, se tiran dos modernos arcos escarzanos de 19,50 metros y una pila de 2,90 [FIG. 5]. Esta es la parte erigida en el siglo XIX, llevándose a cabo no por la destrucción de los tres arcos anteriores (que eran la continuación del tramo central) durante la Guerra de la Independencia, sino como reparación de los destrozos ocasionados por una riada acontecida en 1823 [FIG. 6].

Nuestro interés se centra en esta actuación decimonónica puesto que en primer término revela la complejidad de las estructuras administrativas y facultativas en los inicios de la ingeniería moderna; es decir, nos muestra que este ámbito no se encontraba bien definido y conformado, siendo una asignatura pendiente su eficaz organización. La definición de la ingeniería, su situación y relevancia parece lógico dependerían y condicionarían la forma de organización que se defendiese.

El proyecto realizado finalmente para reparar el puente de Andújar tras la riada de 1823 fue de Larramendi, quien visitaría la localidad jienense entre 1827 y 1828. El ingeniero Gabriel Gómez Herrador lo llevó a cabo en 1830. No obstante, en los años anteriores, incluso poco antes de la avenida de 1823, fueron varios los maestros que reconocieron el paso. Una completa lista nos arrojaría los nombres de Isidoro Sartorio, Juan Bautista Lacorte, Antonio Mirón, Silvestre Pérez, Francisco Javier de Mariátegui, Pedro Nolasco de Ventura y Antonio Prat. A esta relación incluso podríamos añadir a Francisco Javier Barra, quien examinó los proyectos de Prat y Mariátegui. Pero la lista no solo es extensa y variada, yendo de figuras principales como Pérez o Larramendi a

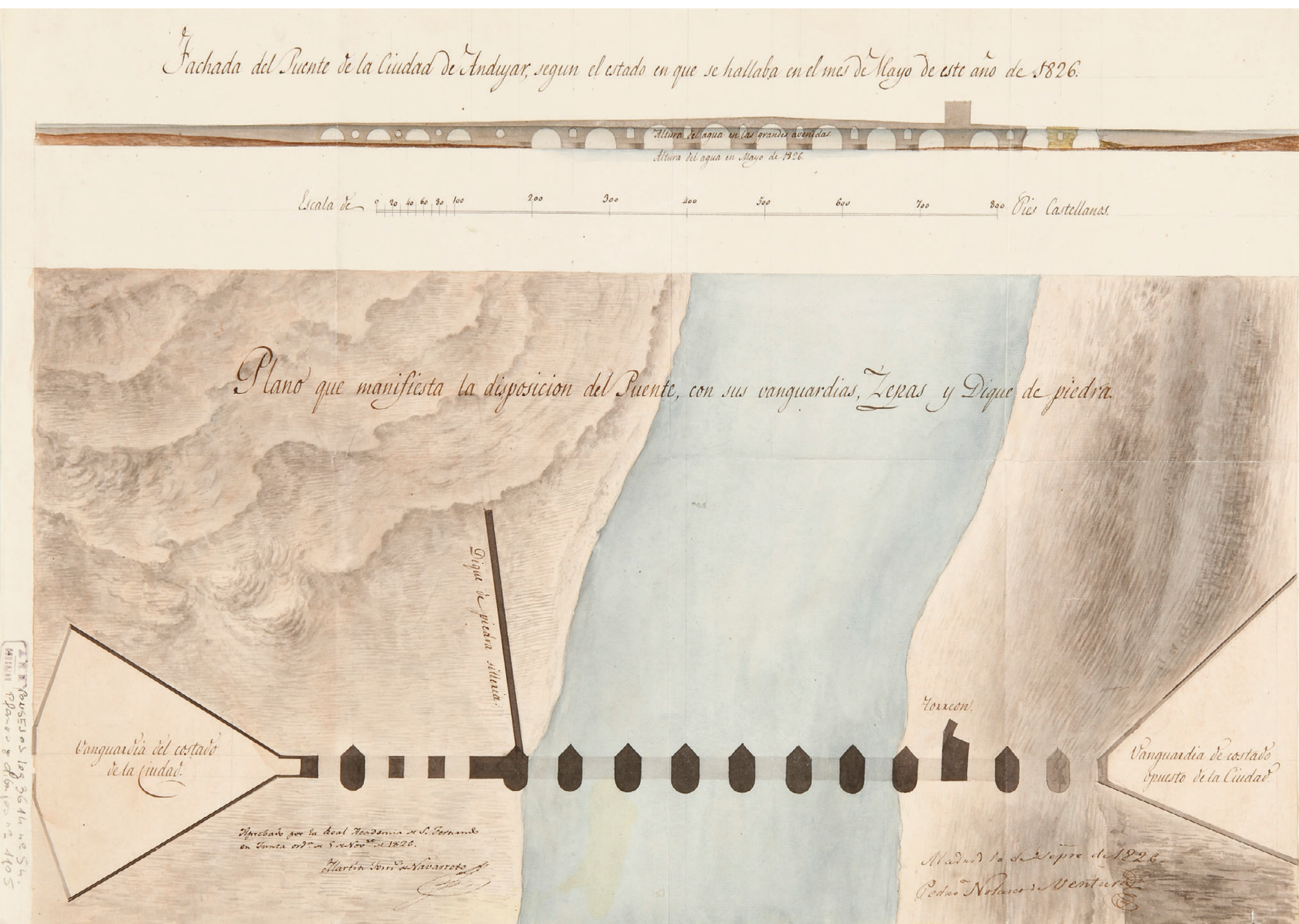


FIG. 6 PEDRO NOLASCO DE VENTURA, *Fachada del puente de la ciudad de Andújar, según el estado en que se hallaba en el mes de mayo de este año de 1826…* 1826, Archivo Histórico Nacional, Consejos, MPD. 1105.

otras claramente secundarias. También llama la atención que tales maestros perteneciesen y fuesen enviados a Andújar por distintas instituciones. Así, Sartorio, Lacorte, Mariátegui, Prat y los propios Larramendi y Gómez Herrador dependieron de la Dirección General de Caminos (o de Correos y Caminos, dependiendo la época) que aglutinaba al primigenio cuerpo de ingenieros de caminos y canales. Pérez y Nolasco de Ventura, en cambio, eran arquitectos llegados a Andújar por orden de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid, órgano consultivo del Consejo de Castilla en materia de edificación, incluidas las obras públicas.

Esto no quiere decir que la formación de unos y otros, de arquitectos e ingenieros, así como las obras que acometieron, estuviesen claramente delimitadas. Todo lo contrario: Pérez y Nolasco de Ventura no solo fueron destinados a Andújar para reparar su puente, sino que este encargo no fue aislado. Sabemos que Nolasco fue durante varios años director de Caminos del Reino de Navarra; por su lado, Silvestre Pérez, cuando dejó

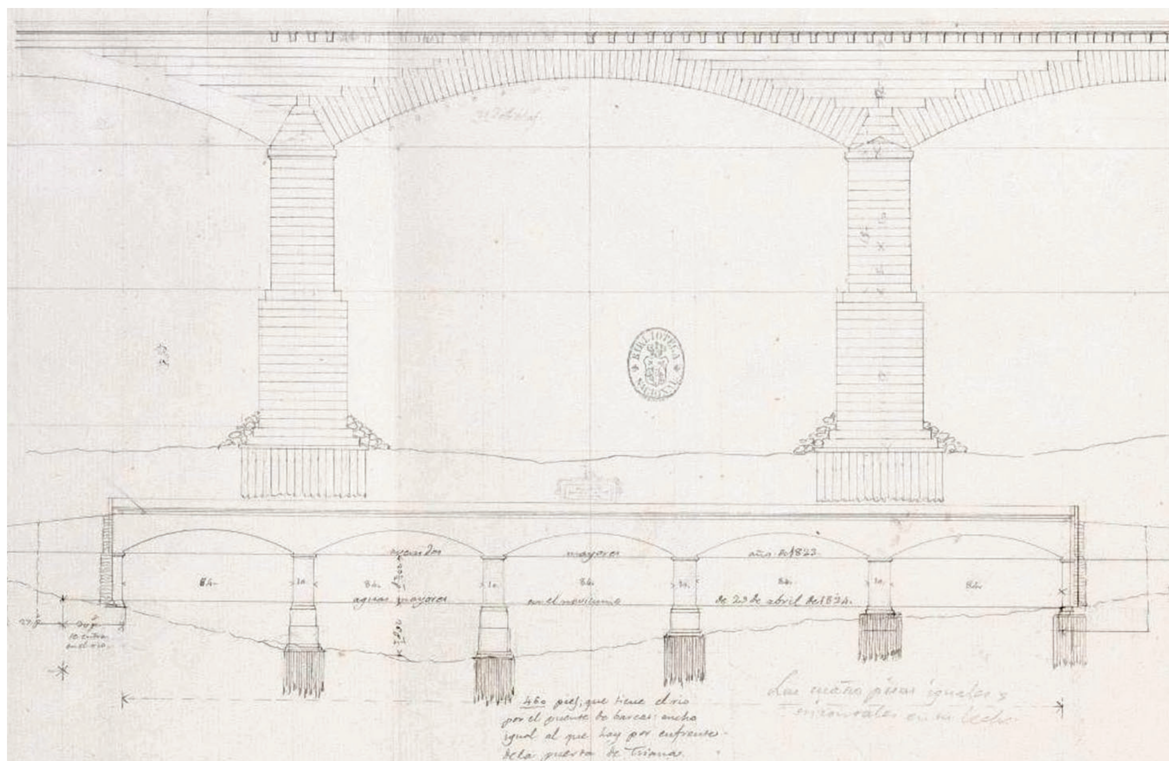


FIG. 7 SILVESTRE PÉREZ, Detalle del *Proyecto para el puente de Triana*, 1824. Biblioteca Nacional de España, DIB/14/27/72.

Andújar, se dirigió a Sevilla donde, entre otros proyectos, trazó un moderno puente de sillería para sustituir el tradicional de barcas de la capital hispalense [FIG. 7].

En el sentido contrario, Lacorte, Mariátegui, Prat y Larramendi tuvieron el título de arquitecto expedido por la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Es más, maestros como Mariátegui o Prat desarrollaron una interesante actividad arquitectónica a lo largo de su trayectoria. Incluso deberíamos recordar que Sartorio, Mariátegui y Prat fueron de igual modo ingenieros militares, si bien con una desigual carrera en este ámbito.

Todo ello nos muestra el perfil heterogéneo de quienes realizaron obras públicas e incluso pertenecieron al primitivo cuerpo de ingenieros de caminos y canales, en un momento en el que la propia ingeniería civil moderna se estaba definiendo y organizando su estructura profesional y facultativa. Todavía no aparecía clara la diferenciación entre arquitectura e ingeniería. De hecho, los informes que conservamos de los ingenieros así como del arquitecto Nolasco de Ventura no difieren en la determinación del problema del puente de Andújar, que no era otro, según opinión unánime, que la escasa luz de los arcos y lo masivo de sus pilas. Solo conservamos los planos de la propuesta de Nolasco de Ventura y en ellos se evidencia su intención de rehacer el puente con unos arcos escarzanos y una pilas que recuerdan –y mucho– los de Molins de Rei grabados por Sánchez Taramas. Nolasco de Ventura preveía realizar primero el tramo afectado por la riada y, cuando hubiese dinero y nuevas avenidas maltratasen aún más la parte antigua, reconstruir el puente por completo [FIGS. 6 y 8].

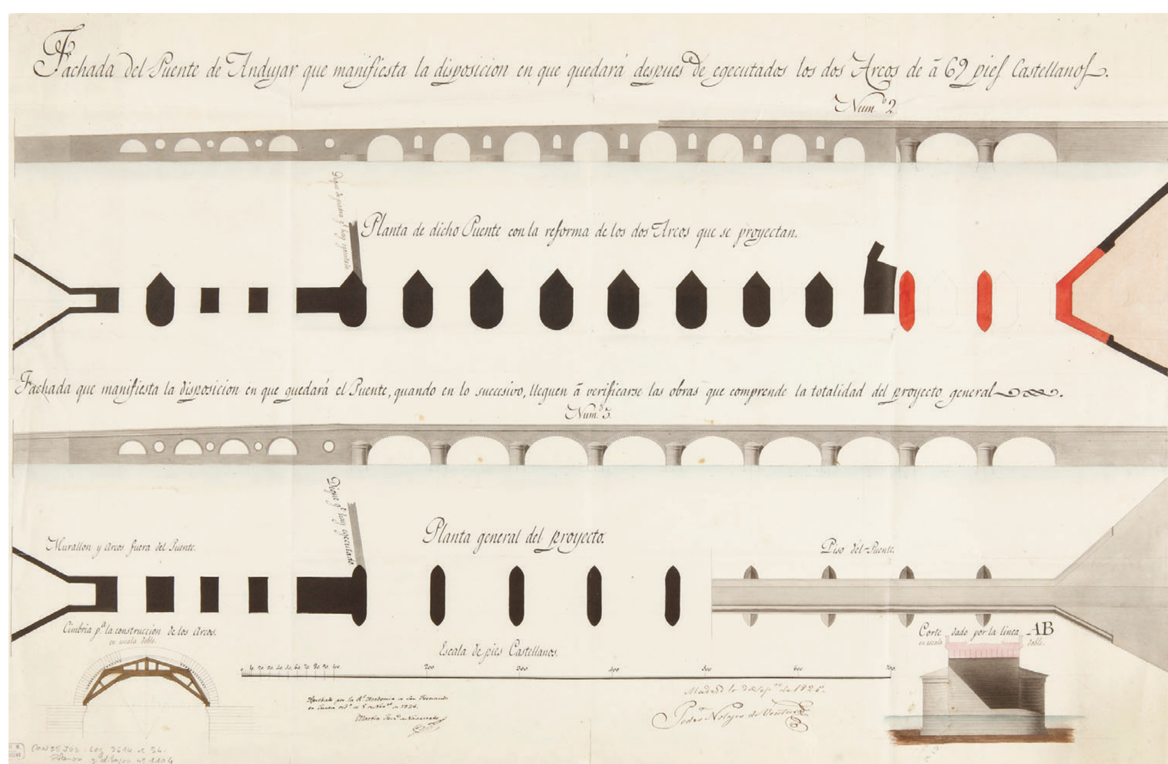


FIG. 8 PEDRO NOLASCO DE VENTURA, *Proyecto de reconstrucción del puente de Andújar…* 1826, Archivo Histórico Nacional, Consejos, MPD. 1104.

Sin embargo, en los informes de maestros vinculados a la Dirección General de Caminos, en especial en los de Mariátegui y Prat, detectamos interesantes argumentos. Ninguno de los dos se limitaron a proponer una mera solución para reparar el puente de Andújar, sino que fueron más allá. Destacaron que los puentes eran una de las construcciones más complejas que podían emprenderse, si no la mayor. Por ello, no podía acometerlos cualesquiera, debiendo ser prerrogativa de maestros bien formados y especializados. Tal y como advirtió Mariátegui, «la capacidad de un ingeniero es la principal circunstancia para que semejantes obras salgan con la debida perfección». De hecho, los problemas surgidos en este paso se atribuyeron a que había sido levantado por maestros imperitos en una época con limitados conocimientos hidráulicos. Mariátegui afirmó que el puente era de origen «remotísimo». Según Prat, existía al menos desde que Fernando III conquistó Andújar puesto que le dio por escudo de armas un puente. De ahí su denunciada estructura, de «arcos pequeños y pilares voluminosos» que hacían que el puente pareciese «construido [más] para atajar o detener la corriente, que para darla paso libre».

También coincidieron en que las obras de ingeniería, por las soluciones adoptadas, podían revelar el nivel de ilustración y conocimientos de un país. Por ello apostaron por una solución moderna, que rompiese claramente con la parte antigua del puente, proponiendo sustituir la parte izquierda del paso afectada por la avenida por un tramo con pilas y estribos de nueva forma y dos arcos de gran esbeltez, dos arcos escarzanos de 25 y 16,5 metros respectivamente. Así lo manifestó Mariátegui:

> Es muy sabido que las obras públicas manifiestan la civilización de una nación [...] pretendo dar a este proyecto cierta clase de elegancia y a sus arcos una atrevida esbeltez, a fin de que se aproxime al grado de delicadeza y perfección a que ha llegado el arte de construir en las naciones cultas.

Las ideas expresadas, por tanto, resultaban bastante similares a las de la *Memoria* de 1820, revelándonos que se estaba tomando conciencia y afirmando que se había iniciado un tiempo nuevo para la ingeniería, teniendo al alcance de la mano soluciones renovadoras, muy diversas respecto a las tradicionales y que permitían resultados inéditos: arcos de mayor luz, pilas reducidas, aumentar la capacidad de desagüe, disminuir la sillería utilizada, etc.

Puede llamarnos la atención que este discurso se generase en relación a obras de fábrica, pero lo cierto es que aportaciones dieciochescas como las de Perronet abrieron renovados horizontes. No obstante, nos hallamos en unas fechas en las que en España se empezó a introducir la construcción en un material tan revolucionario como el hierro, que no hizo sino reforzar esta idea de una nueva era para la ingeniería, distanciada cada vez más de las soluciones del pasado y desbrozando opciones antes ni siquiera soñadas. Es significativo que en las mismas fechas en las que Larramendi pasó por Andújar, este ingeniero trazase un proyecto de puente colgante de hierro para sustituir al de barcas de Sevilla, aquel que Pérez quiso cambiar por uno de sillería. De hecho, en una necrológica del arquitecto, fallecido en 1825, se denunció que su solución de fábrica ya era anticuada cuando la propuso.

Su definición como saber complejo y de necesaria y permanente actualización supuso un aspecto clave para la caracterización de la ingeniería moderna, que legitimaba así la conveniencia de un cuerpo especializado, exigente y de prestigio. Desde esta posición el ingeniero decimonónico observó las obras del pasado, siendo diverso su punto de vista al de los siglos XVII o XVIII. Las obras ya no eran antiguas, ya no era simplemente que sus estructuras hubiesen sufrido los embates del tiempo; ahora se dijo que eran anticuadas, cuando no obsoletas y caducas. Costaría encontrar entre los muchos informes del siglo XIX que hemos leído sobre intervenciones en puentes históricos, los que no cayeron en tales argumentos. La mayoría de los ingenieros propusieron sustituirlos por obras nuevas que conseguirían muy distintas prestaciones mucho mejor adaptadas, además, a las condiciones de uso y movilidad de los nuevos tiempos. Por fortuna, la permanente carencia presupuestaria de un siglo complicado salvó multitud de puentes del pasado.

Pero ni siquiera en este momento tal punto de vista, siendo mayoritario, fue omnímodo. También en el siglo XIX comprobamos que fue fraguándose y desarrollándose la consideración patrimonial de algunas obras públicas, juzgándose que por el hecho de ser históricas, por ello precisamente, debían ser preservadas. Por tanto, el debate entre la innovación, la fascinación por las inéditas posibilidades de la modernidad por un lado, la conservación y el uso de lo pasado por otro, ya estaba planteado. Destaquemos que si bien la ingeniería moderna se definió desde lo nuevo, no agotó su discurso en la exaltación del adelanto y del mero uso, teniendo desde un inicio un sugestivo desafío en su relación con lo histórico y lo patrimonial.

BIBLIOGRAFÍA

Archivo General de la Administración, exp. 04 24/2340; 04 24/5744; 04 24/5747.
Archivo Histórico Nacional, Consejos, exp. 3614-54.
Archivo Histórico Provincial de Jaén, exp. 31746.
Archivo del Ministerio de Fomento, sign. 6311.
Archivo de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Juntas de la Comisión de Arquitectura, 1824-1831, sign. 3-141.
CRESPO DELGADO, D. (2014), «Conquistar los ríos: literatura e iconografía de las obras hidráulicas en la España de la Ilustración», en D. ROMERO MUÑOZ (comp.), *Obras hidráulicas de la Ilustración*, Madrid, CEHOPU, Fundación Juanelo Turriano, pp. 27-37.
CRESPO DELGADO, D. (2015), «Ingeniería civil e Ilustración en España: ideas e imágenes», en A. CÁMARA MUÑOZ y B. REVUELTA POL (coords.), *Ingeniería de la Ilustración*, Madrid, Fundación Juanelo Turriano, pp. 35-47.
CRESPO DELGADO, D. «El puente de Andújar y la ingeniería civil española a principios del siglo XIX», *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses* (en prensa).
CRESPO DELGADO, D. y LUJÁN DÍAZ, A. (2016), *Mirar el paisaje moderno. Paisaje, ingeniería e industria en los viajes por España (siglos XVI-XIX)*, Madrid, Polifemo.
CRESPO DELGADO, D. y REVUELTA POL, B. (2014), «Historia del patrimonio de la ingeniería civil en España (s. XVI-1936): un proyecto de la Fundación Juanelo Turriano», *Revista de Obras Públicas*, nº 3559, pp. 35-42.
DOMÍNGUEZ LÓPEZ, C. y SÁENZ RIDRUEJO, F. (1999), *José Agustín de Larramendi: primer ingeniero de caminos, canales y puertos*, Bilbao, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del País Vasco.
El Camino de Andalucía. Itinerarios históricos entre la Meseta y el Valle del Guadalquivir (1993), Madrid, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
FERNÁNDEZ CASADO, C. (2008), *Historia del puente en España: puentes romanos*, Madrid, CSIC.
GENTIL BALDRICH, J. M. (1997), «La Dirección General de Caminos, y otros personajes, en 1823», *Revista de Obras Públicas*, nº 3365, pp. 61-70.
GENTIL BALDRICH, J. M. (1997), «Noticia de Antonio Prat, arquitecto del Salón de Cortes de 1813», *Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando*, nº 85, pp. 463-505.
GÓMEZ MARTÍNEZ, E. (1996), «Los puentes de Andújar sobre los ríos Guadalquivir y Jándula. Sus fábricas. Importancia económica y religiosa en el siglo XVII», en *Caminería Hispánica. Actas del II Congreso Internacional de Caminería Hispánica*, Madrid, P.A.H., Asociación Técnica de Carreteras, pp. 329-343.
LEÓN, J. y BAUDER, E. (1999), *La construcción de un puente en el siglo XVIII. El puente de Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet / Der Bau einer Brücke im 18. Jahrhundert. Die Brücke von Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Fundación Agustín de Betancourt.
LUJÁN DÍAZ, A. (2015), *Obra pública y modernidad. Primeras aplicaciones del hierro en los puentes españoles (1815-1846)*, Valencia, Generalitat Valenciana.
MARTYKÁNOVÁ, D. (2012), «Palabras de la ciencia útil: los pilares conceptuales del discurso corporativo de los ingenieros de Estado», en M. PÉREZ LEDESMA (ed.), *Lenguajes de modernidad en la península Ibérica*, Madrid, Servicio de Publicaciones de la UAM, pp. 389-430.
Memoria de la Comisión de Caminos y Canales sobre las comunicaciones generales de la Península, s.l.: Madrid, s.i., s.a.: ¿1820?
MOLEÓN GAVILANES, P. (2009), «Francisco Javier de Mariátegui y Solá. Notas para su biografía», en *El Noviciado de la Universidad en Madrid. 1836-1843*, Madrid, Consorcio Urbanístico de la Ciudad Universitaria de Madrid, pp. 81-90.
NAVASCUÉS PALACIO, P. (1973), *Arquitectura y arquitectos madrileños del siglo XIX*, Madrid, IEM.
NAVASCUÉS PALACIO, P. (1998), «El Palacio», en *El Congreso de los Diputados*, Madrid, Congreso de los Diputados, pp. 164-234.
RUBIATO LACAMBRA, F. J. (2004), *Los puentes del Guadalquivir*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
SÁENZ RIDRUEJO, F. (1990), *Los Ingenieros de Caminos del siglo XIX*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
SÁENZ RIDRUEJO, F. (2013), «De la Escuela de Caminos al Museo del Prado. Historia, incompleta, de un cuadro de Goya», *Revista de Obras Públicas*, nº 3541, pp. 17-22.
MULLER, J. (1769), *Tratado de fortificación o arte de construir los edificios militares y civiles… aumentado con notas, adiciones y 22 láminas… por Miguel Sánchez Taramas*, Barcelona, Thomas Piferrer.

Volver al índice

5

Modelos históricos en la Escuela de Caminos (UPM): formación y disolución de un museo

PEDRO NAVASCUÉS PALACIO
Dr. en Historia del Arte
Académico de BB.AA. Catedrático emérito de la UPM

La utilización de los modelos para mostrar la imagen tridimensional de un nuevo proyecto fue un hábito común en la historia de la construcción desde tiempo inmemorial y en todas las culturas. Pero así como en el ámbito de la arquitectura[1] esta práctica cuenta con un gran número de ejemplos que han sobrevivido en el tiempo y han sido objeto de numerosos estudios, antiguos y recientes[2], no sucede lo mismo con las maquetas y modelos históricos de ingeniería civil, y muy concretamente con los referidos a las obras públicas, que ni se han estudiado ni han sobrevivido, produciéndose así un injusto vacío historiográfico y un desdén intelectual hacia lo que ha formado parte del pensamiento educativo y del progreso. Con estas líneas queremos llamar la atención sobre el valor documental y alcance de este patrimonio que no hemos sabido ni querido conservar, a pesar incluso de su valor y belleza material, habitualmente desdeñado y tenido, en el mejor de los casos, como mero objeto de curiosidad, de coleccionista, de pieza de museo, de simple adorno y mera apariencia sin contenido propio y original. A nuestro juicio estos modelos históricos son un formidable documento que dicen por sí mismos lo que, a menudo, la documentación gráfica y escrita silencia o nunca recogió[3].

La etapa más interesante de estos modelos de ingeniería civil que calificamos de «históricos» por su origen, significación y función, para distinguirlos del simple «modelismo» amateur, circunstancial o comercial, fue la que va desde 1750 a 1950, es decir, dos siglos de invención y progreso que transformaron la sociedad, a partir de la Revolución Industrial. Para pulsar el alcance de estos modelos que anticipaban o recogían las novedades de que era capaz el mundo de la ingeniería y de la construcción, nada como acercarse a las Exposiciones Universales, en las que se visualizaba como en ningún otro lugar la curva ascendente del progreso auxiliado por la industria. Recordemos que el verdadero y completo nombre de la primera Exposición Universal de Londres (1851), era el de *Great*

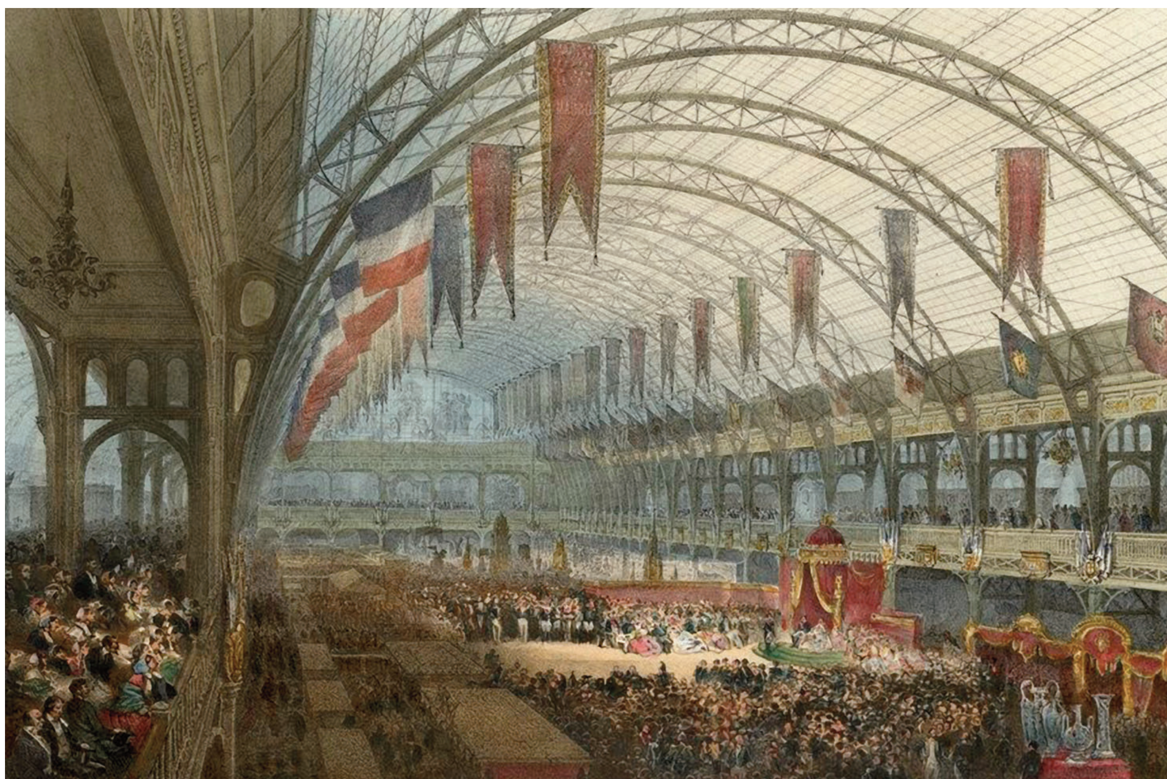


FIG. 1 J. ARNOUT, *Inauguration de l'Exposition universelle par S. M. l'empereur Napoléon III*, 1855. Litografía. La nave central tenía 50 m de luz y alcanzaba una altura de 30 m.

Exhibition of the Works of Industry of All Nations. En la siguiente Exposición, celebrada en París en 1855, que claramente entraba en competencia con la londinense, al margen de la exhibición de las tradiciones y costumbres de todos los países participantes, la industria fue el verdadero motor del certamen, la que concitó la verdadera curiosidad e interés de las gentes. Un dato revelador es que el número de visitantes que entonces tuvo el Palacio de la Industria se acercó a los cuatro millones mientras que el Pabellón de Bellas Artes no llegó al millón. La propia imagen de los edificios, que daban cobijo tanto a la tradición como al progreso, se convertían en santo y seña del nuevo tiempo en sus novedosas estructuras. En Londres fue el *Crystal Palace*, de Paxton, y en París, el *Palais de l'Industrie* en los Campos Elíseos, obra del máximo interés, aunque fagocitada luego por el Grand Palais de la Exposición Universal de 1900. Aquel Palacio de la Industria, de una apariencia monumental y tradicional con fachadas de fábrica debidas al arquitecto Jean-Marie-Victor Viel, encerraba en su interior una construcción metálica, diáfana y ligera, proyectada por el ingeniero Alexis Barrault[4]. Bajo aquella luminosa estructura estuvieron expuestos miles de objetos y modelos, de los que solo queremos recordar ahora aquellos que tienen relación con el propósito de estas páginas, esto es, los modelos relativos a la ingeniería civil donde: «El ministerio de Agricultura, Comercio y Obras Públicas [Francia] ha hecho hacer a la Escuela de Puentes y Calzadas, una colección verdaderamente notable, que ofrece, en una serie de modelos tan bien ejecutados como filosóficamente concebidos, los elementos más completos que se puedan encontrar actualmente para apreciar la naturaleza, la importancia y el carácter específico de las principales obras

ejecutadas en nuestro país en los últimos veinticinco años, sobre todo desde el establecimiento del ferrocarril. Diques, esclusas, acueductos puentes, viaductos, faros, etcétera, están aquí representados, bien como modelos de las mejores soluciones halladas por los ingenieros más sobresalientes, bien como ejemplos de las obras ejecutadas»[5].

En aquel año de 1855 Lucio del Valle se encontraba en París con el nuevo encargo del Gobierno español relacionado con los faros, coincidiendo allí con otros dos ilustres ingenieros, Ramón Echevarría y Andrés Mendizábal que, a su vez, estaban con temas ferroviarios. Naturalmente, visitaron la Exposición Universal y redactaron conjuntamente unos interesantes *Apuntes sobre los objetos correspondientes al ramo de Obras Públicas*[6] que resultan, a los efectos de este trabajo, extremadamente oportunos, de los que copiaremos algunos párrafos extraídos del texto que comienza con una contundente afirmación: «Las Obras Públicas constituyen uno de los primeros elementos de prosperidad de las naciones». Luego los autores recogen las impresiones causadas «al contemplar en este gran concurso este infinito número de objetos y modelos en que aparecen o se representan los grandes trabajos de utilidad que se han llevado a cabo en estos últimos años, los muchos que hoy se encuentran en curso de ejecución y los que en el día se proyectan, ya no es posible dudar que el mundo va a sufrir en breve un cambio radical y completo en su bienestar material y en la mayor parte de las relaciones sociales… Es la principal impresión que producen en las primeras visitas las numerosas y magníficas colecciones de objetos y modelos correspondientes a las obras públicas que han remitido las diferentes naciones».

Cuando Valle y sus compañeros hacen el análisis de las obras presentadas, a pesar de manifestar su repetida queja por «la prohibición absoluta de tocar y examinar los productos, de tomar medida alguna, y hasta de copiarlos a ojo», surge la imagen de la obra descrita que cuesta resucitar con precisión, más allá del nombre y la escala, pero que encierra el mayor atractivo para el estudioso, aunque solo sea por la selección hecha de las obras que suponen la máxima modernidad y aprecio por el respectivo país, destacando siempre Francia e Inglaterra como las más poderosas. Sirvan de ejemplo los modelos de los puentes de sillería que presenta la École nationale des ponts et chaussées, seguramente los últimos puentes de piedra que se asoman a un certamen internacional donde el empleo del hierro señala el futuro, e incluso donde la obras de sillería se refieren a los primeros viaductos ferroviarios, como el que atraviesa el río Bouzanne en Le Pont-Chrétien-Chabenet, construido entre 1848 y 1853, el viaducto sobre el Durance y el viaducto sobre el Dinan, todos en la misma escala (0'04). Igualmente se exponía el modelo del Pont Tiffroy, sobre el Mosela en Metz, con el reciente ensanche hecho por los ingenieros Le Mercier y Le Joindre, entre 1853 y 1854, es decir, se trata de modelos todos de la máxima actualidad. No obstante, el modelo que más llamó la atención a nuestros ingenieros fue el del acueducto de Roquefavour (1841-1847), con tres niveles de arcos, obra del ingeniero Frantz Mayor de Montricher. Este acueducto forma parte del Canal de Marsella sobre el Valle del Arco que abastece de agua a la ciudad y se conserva actualmente en muy buen estado (alt. máxima 82 m, long. total 393 m, y 16 m de luz), desconociéndose el paradero de los modelos que se expusieron en 1855 pues los *Apuntes* de Lucio del Valle hablan de un modelo de corcho (escala 0,05), de regular interés, de un artista marsellés y otros tres hechos por Charrier. El primero de ellos mostraba los cuatro

arcos contiguos a la orilla derecha (escala 0,04); el segundo, con una escala de 0,10, mostraba detalles constructivos, y un tercero, el alzado de un tramo, pero con el interés añadido de mostrar «las cimbras, los puentes de servicio, las grúas de carriles, el aparejo de la sillería y otros muchos pormenores». De todos ellos y por viejas fotografías podemos localizar el de los cuatro tramos, modelo que ya había figurado en la Exposición Universal de Londres (1851) y que luego iría a la de Filadelfia de 1876[7], para terminar en la galería de modelos de la École nationale des ponts et chaussées hasta su desmantelamiento en 1955, desconociendo su actual paradero y muy probablemente destruido como la mayor parte de aquel extraordinario conjunto.

Entre los puentes ingleses de sillería los ingenieros españoles solo recordaban el entonces reciente puente Victoria (1851-1854) sobre el río Clyde en Glasgow, del ingeniero James Walker, pues, según Valle, los ingleses preferían mostrar sus modernas obras en hierro.

Pero más allá de la relación de obras, siempre interesante, los autores de los *Apuntes* hacen una serie larga de observaciones sobre los modelos mismos, reflexionando que en lo escrito «sólo aparecen los modelos como si fueran verdaderas obras, es decir, considerados bajo el punto de vista del pensamiento o concepción de los sistemas y trabajos de construcción, y en cuanto se refiere a modo de llevarlos a cabo. Bien merecen sin embargo los muchos y magníficos modelos de todas clases que figuran en los salones, que como objetos ellos mismos de construcción especial, les consagremos algunas líneas». Un largo *excursus* sobre los materiales utilizados en los modelos, entre los que domina la madera y el yeso, les lleva a hacer un repaso de los que se emplearon, sin dejar de citar las «láminas azogadas que dan gran brillantez y propiedad a los modelos» usadas para representar el agua.

Desde estos aspectos meramente materiales pasan los *Apuntes* a consideraciones más atractivas llamando la atención sobre el valor de las dos colecciones de modelos más notables de la Exposición, «así por la naturaleza de las obras que representan como por la fidelidad, esmero y delicadeza que se observa en su ejecución, luchan y se disputan la preferencia. Una de ellas es la Escuela de puentes y calzadas de Francia, y otra la remitida por los ingenieros ingleses. En la primera hay primorosos modelos de Charrier, Marquet, Pradel, Letestu y otros artistas distinguidos. Perfectamente dispuestas y presentadas las obras que en ellos se trata de representar, y trabajados con gran maestría el yeso, la madera, el hierro y demás materiales que entran en su composición, forman estos una colección que figurará con ventaja en el magnífico Museo de la Escuela [de Puentes y Calzadas de París], en el que sirviendo para la enseñanza de los alumnos y para la instrucción y recreo de las personas que visitan el establecimiento, se hallan reunidos los trabajos más importantes que en los diversos ramos que forman el instituto del Cuerpo de Ingenieros se han llevado a cabo de medio siglo a esta parte en el imperio francés».

No obstante Valle y sus compañeros reconocen que «como obras de conjunto son más bellos y más ricos también en sus detalles, los magníficos modelos ingleses construidos por Salter. Al examinar los que representan los diferentes sistemas de puentes y los puertos ... no se puede por menos de admirar la grande exactitud y perfección con que aquel artista ejecuta esta clase de objetos, poniendo igual esmero en la labra de las grandes masas de yeso perfectamente preparado para representar la sillería y mampostería, como

la ejecución de todas las piezas de madera y hierro, por pequeñas y complicadas que sean. En todos los trabajos de Salter hay completa armonía y un gusto especial para presentarlos de manera que produzcan el mejor efecto posible».

Al lector de estos apuntes no le pasa desapercibido el hecho de que Valle, Echevarría y Mendizábal estuvieron pensando continuamente en nuestra Escuela de Caminos de Madrid, donde los tres se habían formado y de la que algunos fueron profesores, al ver con justa envidia aquellas colecciones de modelos y, muy señaladamente, la actividad de la École nationale des ponts et chaussées, de tal modo que como colofón de su escrito manifiestan muy claramente: «Hemos pasado esta revista a los modelos expuestos en el certamen, para que mejor se comprenda la importancia que se les da en los países adelantados. Precisamente las obras públicas son las que más interesan a la generalidad, y las colecciones que con ellos se forman las que más curiosidad excitan en el día. De desear sería que siguiendo nosotros este ejemplo diéramos al Museo de nuestra Escuela



FIG. 2 Galería de modelos de la École nationale des ponts et chaussées, París, 1924.

El primer faro de la izquierda es el de Héaux-de-Bréhat (1835-1839), obra temprana de Léonce Reynaud, Inspector general de Ponts et Chaussées y Director del Servicio de Faros y Balizas. Su *Traité d'architecture* incorpora su alzado y diferentes secciones (París, planches, t. II, 1ª ed., París, 1858, pl. 67). En la Exposición Universal de París de 1855 figuraron «tres modelos en yeso, perfectamente ejecutados en escala 0,04, para detallar por completo todos los pormenores del faro de sillería de Héaux-de-Bréhat, obra del Ingeniero Jefe Mr. Reynaud… puede considerarse este monumento como uno de los primeros de su clase» (Lucio del Valle y otros: *Apuntes sobre los objetos correspondientes…* Madrid, Imp. Nacional, 1855, p. 320). Al fondo, y en el mismo lado izquierdo, se ve el espectacular modelo del acueducto de Roquefavour (1841-1847), con tres niveles de arcos, a una escala 0,04, que figuró en las Exposiciones Universales de 1851, 1855 y 1876, obra magnífica del ingeniero Frantz Mayor de Montricher (1810-1858). Foto Agence Rol. Bibliothèque nationale de France, département Estampes et photographie, EI-13 (1103). En línea en Gallica.



FIG. 3 Galería de modelos de la École nationale des ponts et chaussées, cuando estaba en los antiguos locales de la rue des Saints-Pères (París), antes de su dispersión y destrucción en 1955. A la derecha, en primer término, el puente «tournant» ferroviario sobre el Canal de Caronte, del que toma su nombre (1908-1915), en Martigues (Bouches-du-Rhône), Provence-Alpes-Côte d'Azur, Francia. Foto © École nationale des ponts et chaussées.

[de Madrid] más desarrollo del que se le ha dado hasta aquí. Mucho ganaría así la enseñanza, y el público podría tener con facilidad conocimiento de las obras más notables que se hayan llevado a cabo o se ejecuten en adelante en la península, islas adyacentes y demás posesiones de España».

Partiendo de esta reflexión sobre las Escuelas de París y Madrid en relación con los modelos, también trazaremos aquí unos breves *apuntes* sobre las que fueron dos colecciones de modelos, la francesa más importante y conocida que constituyó en su día la Galería de modelos de la École nationale des ponts et chaussées en París, y otra más modesta pero igualmente notable e interesante que configuró el desaparecido Museo de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Una y otra tuvieron un final igualmente desdichado hasta su práctica destrucción, que pone en evidencia el histórico desdén hacia estos modelos. El desmembramiento de la colección de París es una historia dolorosa pese a los esfuerzos hechos para su recuperación cuando ya era tarde y no había remedio[8]. Para una aproximación de su situación en un momento determinado de su historia resulta fundamental la consulta del catálogo que de esta colección redactó, en 1873, el ingeniero Baron, encargado de su conservación. Allí se menciona su origen y desarrollo, de un modo sucinto pero suficiente, recordando que «*Perronet, qui, dans sa longue et brillante carrière, ne cessa de faire exécuter des travaux comptés à juste titre parmi*



FIG. 4 École nationale des ponts et chaussées. Foto Agence Rol (1924).

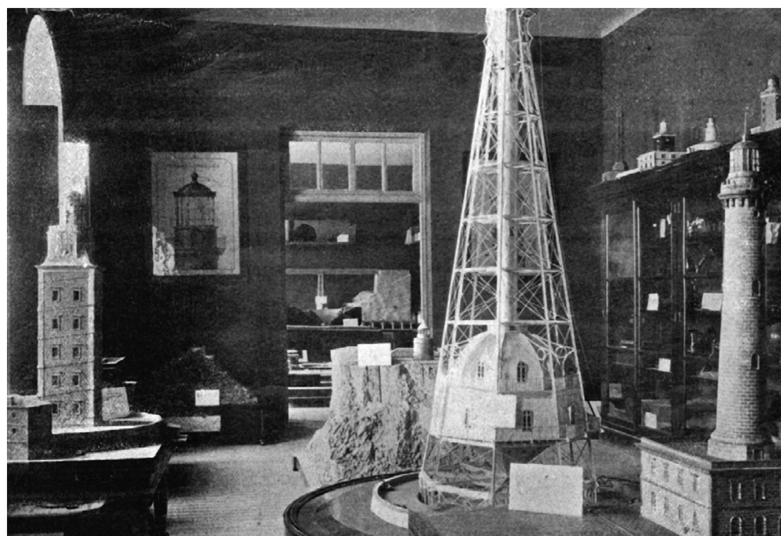
les plus importants de l'époque, a fait établir plusieurs modèles de ses machines et de ses principaux ouvrages d'art; il les a légués à l'École en même temps que sa précieuse bibliothéque. Cet esemple eut des imitateurs, au nombre desquels on se bornera à citer Lesage et de Prony. Tels sont les origines des collections qui constituent aujourdu'hui les galeries et de la bibliothèque de l'École, collections qui sont enrichies, gràce à un crédit annuel consacré aux acquisitions, et sourtout aux nombreux modèles que le Ministère des travaux publics a fait construire pour les expositions universelles de 1855, 1862 y 1867, et qui sont revenues à l'École»[9].

Aquella tradición que buscaba enriquecer el material didáctico de la Escuela se repitió en sucesivas convocatorias de tal modo que en 1878, con motivo de la Exposición Universal de París, la École nationale des ponts et chaussées expuso una serie de trabajos al tiempo que hacía un balance de su propia historia, de su rica biblioteca y de su galería de modelos, que en aquellos momentos contaba con más de doscientos: «*Beaucoup des ces modèles, par la finesse et par la perfection de leur exécution, sont d'un grand prix et d'un haut intérêt*»[10]. Pero en el siglo XX empezaron a estorbar estos modelos de tal modo que esto es lo que se puede leer hoy en la página web oficial de la actual «École des Ponts. ParisTech», al referirise a su histórica *Collection des instruments, maquettes et machines*: «*Les maquettes sont conservées dans la galerie des modèles, construction typique de verre et métal, 26, rue des Saints-Pères jusqu'à la démolition de celle-ci fin 1954. Une partie d'entre elles parmi lesquelles celles de Perronet ou Lesage sont alors dispersées et déposées dans des musées ou des services de l'Équipement. D'autres, jugées sans valeur ou en très mauvais état, sont détruites*»[11].

Comentamos aquí este hecho por cuanto que, en una escala menor, representa una historia paralela a las vicisitudes vividas por los modelos del que fue Museo de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos de Madrid, igualmente destinados a la enseñanza y partiendo de una colección anterior. En efecto, la figura inicial de Agustín de Betancourt[12] en el siglo XVIII y su preocupación por formar una colección de modelos, al igual que Perronet, para el que sería Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro y, finalmente, la creación de la Escuela de Ingenieros de Caminos siguiendo el patrón de la École nationale des ponts et chaussées que conocía bien, permiten establecer un respetuoso paralelismo entre ambos ingenieros[13]. Sabemos por la correspondencia de Betancourt su directa dedicación a la construcción de modelos durante su estancia en Francia, prolongada en 1786 para estudiar hidráulica y maquinaria en general, bien encargando su realización a otros, bien haciéndolos él mismo con una finalidad muy concreta: «Sigo en mi casa haciendo ejecutar la colección de modelos hidráulicos, de que he hablado a Vm. en mis anteriores, en la cual tengo empleados a cuatro ebanistas, siete cerrajeros y tres dibujantes, siendo preciso que yo examine dos o tres veces al día cuántas piececitas hace cada uno, y que haga por mis manos los planos de cada máquina, pues es cosa que no la puedo dar a hacer. De toda esta tarea continua lo que me consuela es que están todos muy contentos con lo que hago, y tendré el gusto toda mi vida de haber formado el mejor gabinete de máquinas que habrá en Europa»[14]. Se trata del Real Gabinete de Máquinas, abierto en 1792 y concebido desde que «Hallándome en París el año de 1786, me mandó el Excmo. Sor. Conde de Floridablanca que me dedicase a adquirir los conocimientos de hidráulica... y formar una colección de modelos tanto de algunos puentes, esclusas y otras obras hidráulicas, como de las mejores máquinas que han servido y se usan en el día...» [15]. Solo por dar una idea al lector, entre aquellos modelos había dieciocho puentes y cimbras, citándose entre los puentes de piedra los modelos de un arco del de Neuilly (1773), y los puentes completos de Sainte-Maxence (1775), sobre el río Oise, y de Brunoy (1784), sobre el río Yerres, los tres de Perronet, componiendo, en efecto, una colección excepcional.

Estos y otros modelos pasaron a identificarse o formar parte de los fondos de la *primera* Escuela de Caminos cuyos estudios se iniciaron en dependencias del Palacio del Buen Retiro en 1802, pero la Guerra de Independencia terminó en 1808 con la embrionaria Escuela y con el Gabinete de Máquinas. Todos los modelos se trasladaron a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando en la calle de Alcalá, y de allí pasaron al Palacio de Buenavista[16], en la propia calle de Alcalá. Con Fernando VII, en enero de 1815 los modelos se trasladaron a la sede de la Real Sociedad Económica Matritense, que los reclamaba para sí, en la calle del Marqués de Cubas (antigua del Turco), hasta que en 1824 los solicitó el recién creado Real Conservatorio de Artes[17]. Diez años más tarde, bajo la regencia de María Cristina, resucitaba en 1834 la *tercera* Escuela de Ingenieros de Caminos, esta vez en el edificio de la Aduana Vieja en la plaza de la Leña, en el corazón de Madrid, y exigió que los modelos volvieran a sus instalaciones. Una Real Orden de 8 de octubre de 1846 de Isabel II, citada por Madoz y seguida por cuantos estudiosos han escrito sobre este asunto, pero sin haber podido localizarla, vino en auxilio de esta petición, al crear un museo en la Escuela de Caminos que tendría «por base los restos del que existió en el palacio del Buen Retiro». Ello motivo la división de lo que quedaba del antiguo fondo del Gabinete de Máquinas, llevándose el Conservatorio de Artes a los nue-

FIG. 5 Sala de Faros del Museo de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. A la derecha el faro de Chipiona (1867) de Eduardo Saavedra; en segundo plano el Faro de Buda de Lucio del Valle (1861), con la posterior adición de un segundo cuerpo de vivienda para los torreros. A la izquierda el modelo de la Torre de Hércules, semejante al modelo de la misma torre hecho por León Gil de Palacio (h. 1824) que, con una escala 1:100, formó parte de los fondos del Museo del Ejército. Los faros de Buda y Hércules figuraron en la Exposición Universal de París de 1867, pasando luego a la Escuela junto con otros muchos reforzando así el fondo más sólido del museo.



vos locales que iba a ocupar en la planta baja del desamortizado Convento de la Trinidad en la calle de Atocha, las máquinas que tenían que ver con un uso industrial. Por otra parte, en 1847, dos reales órdenes trasladaban los estudios de Caminos a la calle del Turco y los restos de tanto naufragio se debieron reparar en el nuevo «taller ocupado en la restauración de aquellos objetos, y dispuesto para la construcción de otros nuevos… muy en breve se establecerá otra sección en que se conserven modelos de obras de carpintería», comenta Madoz en 1850[18].

De esta nueva sección de obras de carpintería se hace eco el Ingeniero Jefe Francisco Carvajal, en 1854, cuando después de referirse al «museo formado con los restos del que existía en la primitiva Escuela y pudieron salvarse de su destrucción, consta de doscientos modelos de toda clase de máquinas empleadas en las construcciones, y de las obras más notables ejecutadas o proyectadas en España y en el extranjero. Algunos de ellos son verdaderos modelos por su ejecución artística, y todos en general están bien construidos y tienen un gran interés en la enseñanza», añade que se debe «citar una magnífica colección de noventa y seis modelos de ensambladuras de madera ejecutada últimamente por D. Mariano Cantin, maestro del taller del museo, que así en este trabajo como en algunos otros, se ha acreditado de artista inteligente y aun especial...»[19].

Coincidiendo con el año de la abdicación de Amadeo de Saboya y la proclamación de la República, se publicó en 1873 una interesante «re-





FIGS. 6 y 7 Arriba: Detalle de la placa de identificación que actualmente lleva el modelo del faro de Buda. Abajo: Las placas antiguas son de latón y llevan, además el número de inventario, como en el modelo del barco-puerta del dique de Gamazo en Santander, procedente de la Junta de obras del puerto de Santander. Fotos del autor.

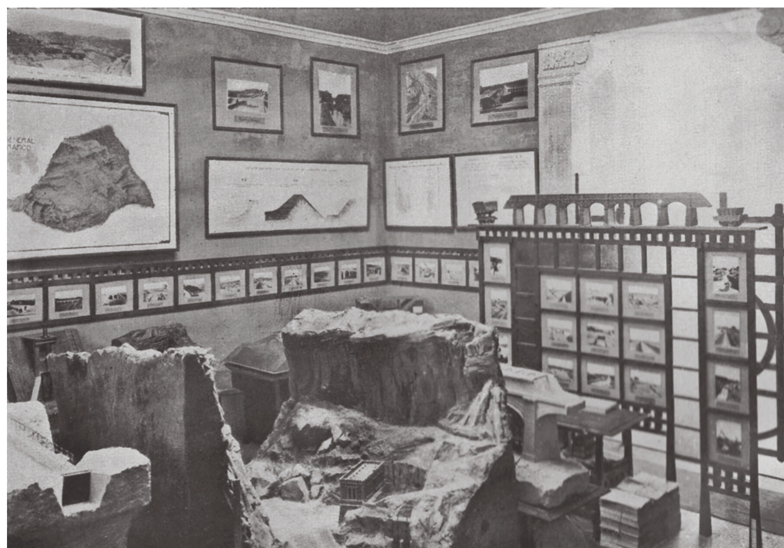
seña de las vicisitudes por las que ha pasado la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos» que incorpora un resumen de los modelos que hay en el museo[20]. Por él llegamos a conocer que contaba el museo con cuatro salas: «En la primera existen once modelos de faros de distintos órdenes, entre los que merece especial mención, por su ejecución esmerada, el de hierro, de segundo orden, de la Isla de Buda». Contaba además esta sala con varios modelos de esclusas, andamios y máquinas para hincar pilotes, muelles construidos en el puerto de la Coruña y «un modelo, notable por su ejecución, del puente de hierro de las Guarrizas», que debe referirse al viaducto de la línea de Manzanares a Córdoba, cuyo modelo se expuso en la Exposiciones Universales de París (1867) y Viena (1873). Había además planos de obras notables, fragmentos de carriles, tejas de cristal, tornillos, cuerdas, cabos y calabrotes de varias clases, etcétera, siendo el estado de los modelos «bueno en su conjunto, habiendo varios perfectamente conservados».

En la segunda sala, también el estado de los modelos era «bueno, en general», y estaba dedicada fundamentalmente a temas ferroviarios como un modelo de puente de hierro, seguramente un viaducto, modelos de bombas, traviesas con sus cojinetes, correderas de vapor, plataformas y cambio de vía, grúa con doble movimiento, trabajos de perforación de un túnel y el modelo de una locomotora del sistema Vaessen, como las que empezaron a funcionar en 1863 en el ferrocarril de Alar a Santander[21] y que bien pudiera estar entre las que hoy conserva la Escuela de Caminos. Había además en esta sala otros modelos de máquinas de vapor, de simple y doble efecto, de ténder, vagón, furgón, locomotora y coche de viajeros, así como una colección completa de herramientas inglesas de carpintería, y varios estantes con medidas métricas, de capacidad y de peso. Entre los modelos y probablemente por mediación de Lucio del Valle, que ese año de 1873 era director de la Escuela y que debió de dar un impulso grande al museo con los modelos presentados en la Exposición Universal de París de 1867[22], se contaban «tres modelos del Depósito del Campo de Guardias en el acueducto del Lozoya».

En efecto, el Canal de Isabel II tuvo una presencia especial en el museo a juzgar por lo recogido sobre la tercera sala donde se reunían fundamentalmente modelos relacionados con temas hidráulicos, «con varios modelos de ruedas y prensas hidráulicas, máquinas de vapor y bombas, turbinas y otros de menos importancia, con el depósito establecido en el campo de Guardias para la distribución en Madrid de las aguas del acueducto del Lozoya». De tal modo que, en la cuarta sala, se acumulaban sin un orden preciso tanto el modelo del «acueducto del Colmenarejo en el Canal del Lozoya», como once puentes de fábrica, hierro y madera; un grupo de esclusas, grúas y cimbras; «un aparato completo de faro de cuarto orden, de tamaño natural»; todos los efectos pertenecientes al servicio de faros, modelos de armaduras, tornos, cabrestantes, molinetes, compuertas, vagones, carretones y carretillas, etcétera.

Lo cierto es que falta una identificación precisa de estos modelos, pero tenemos la impresión de que casi todos ellos debían ser «modernos» sin recuerdo alguno de los procedentes del Real Gabinete de Máquinas del siglo XVIII. La colección reseñada en 1873 aún hubo de superar otra prueba, su traslado al edificio proyectado por Carderera en la calle Alfonso XII, próximo al Cerro de San Blas, en el Retiro, que comenzó a funcionar en el curso 1889-1890. A partir de entonces, entiendo, se reforzó la idea del museo, especialmente en el periodo 1908-1913 en el que fue director de la Escuela el citado in-

FIGS. 8 Vista de la sala dedicada al Canal de Aragón y Cataluña en la Exposición Hispano-Francesa de 1908. En *Canal de Aragón y Cataluña. Exposición hispano-francesa de Zaragoza*, 1º de mayo de 1908.



geniero y arquitecto Mariano Carderera y Ponzán. Este era desde 1908 Inspector general del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos[23], y se hizo cargo de la dirección de la Escuela coincidiendo con la devolución a final de año de los modelos que la Escuela había dejado para la Exposición Hispano-Francesa de 1908, de la que hay interesante información acerca de los modelos tanto en la *Revista de Obras Públicas*[24] como en el *Anuario* que publicó al año siguiente el Ministerio de Fomento[25]. Pero probablemente lo que más llama la atención es el cambio producido en los mismos modelos que ahora se hacían eco de las obras concebidas y ejecutadas en hormigón, dejando atrás las fábricas de piedra, hierro y madera. De la visita hecha por la *Revista de Obras Públicas* a la mencionada Exposición Hispano-Francesa de Zaragoza se dice textualmente: «No se trata de una Exposición de arte retrospectivo; si el faro de Buda irradia su luz desde el testero bajo los laureles del escudo profesional, es sobre los modelos de los muros ataguías de hormigón armado del pantano de Cueva Foradada, de las obras del pantano de Mezalocha, del nuevo rompeolas de Barcelona y sus especiales medios de construcción, de los aparatos Fabregat[26]; de enclavamientos, del sifón del Sosa, del puente Victoria del Manzanares, etcétera», donde se manifestaba la nueva savia de la moderna ingeniería[27].

En el pabellón propio del Ministerio de Fomento allí figuraban, entre los modelos expuestos, los del puente de Ribadesella (escala 1:20) y del puente Victoria sobre el Manzanares (escala 1:25) en Madrid, ambos de Eugenio Ribera; el modelo general del sifón del Sosa (escala 1:400) y el de sus diversas fases de construcción (escala 1:10); el modelo de los muros-ataguías de hormigón armado del pantano turolense de Cueva Foradada (escala 1:25), de Cayetano Úbeda, y un modelo de cajón-molde utilizado en la construcción de dichos muros (escala 1:10); modelo general (escala 1:100) y detalle de los desagües (escala 1:10) del pantano de la Mezalocha (Zaragoza), de Antonio Lasierra. Del ingeniero Francisco Montenegro, director de las obras del puerto de Huelva, figuraba el modelo del muelle norte del puerto onubense con el aparato de hinca y andamio para su montaje (escala 1:10). El nuevo rompeolas del puerto de Barcelona (escala 1:50) y un detalle de los cajones «que sirven de basamento a espaldón» (escala 1:25), de los ingenieros Carlos de Angulo y Julio Valdés. Tres modelos de los aparatos ideados por Fabregat, contramaes-



FIG. 9 Sala de Puentes del Museo de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, en el edificio de Alfonso XII.

tre de los talleres de la vía de los Ferrocarriles MZA, para los pasos de nivel, etcétera.

En el curso 1908-1909 el museo contaba con un Jefe Ingeniero como director del mismo, a la sazón Ricardo Boguerín y de la Fuente, que era profesor de Construcción y tenía a su cargo al «artífice» del museo[28] que entonces era Agustín Alcalde Sanz; un delineante, en la persona de José Sánchez Granados, y un ordenanza que lo era Ángel García. El «artífice» no solo reparaba y conservaba los modelos sino que los construía a partir de los planos del proyecto de modo que su habilidad era elogiada por Carderera y Boguerín, quienes en 1910 manifestaban que «los modelos ejecutados por el artífice del museo están muy bien; lástima que el sueldo que el presupuesto en su escasez asigna a aquel sea tan exiguo, pues es un valioso auxiliar; no sólo ha restaurado inteligentemente bajo la dirección de los Profesores los modelos antiguos, sino que ha ejecutado varios modelos con la vista de los planos, como, por ejemplo, el del puente Victoria», que fue premiado en la Exposición de Zaragoza de 1908.

Con este personal contaba el museo, sin duda escaso para las necesidades que tenía pues, por lo que conocemos en aquel curso escolar 1908-1909, se continuaba con «la reparación de los modelos, en cuya labor es forzoso marchar con gran lentitud por lo delicado del trabajo, pero principalmente por el reducido personal afecto a esta dependencia y el escaso presupuesto disponible», refiriéndose con ello no solo a los modelos prestados para la Exposición de Zaragoza sino a los cedidos al museo por la dirección del Canal de Aragón y Cataluña, después de la Exposición Hispano-Francesa, entre ellos el del puente del sifón del Sosa, hoy conservado.

Al mismo tiempo se estaban preparando los modelos que se iban a prestar para la Exposición Regional de Valencia y para la Exposición Regional Gallega de Santiago de Compostela (Pabellón del Ministerio de Fomento) en el mismo año 1909, esperando recibir otros además después de su clausura lo que agobiaría aún más la situación. Se pensó en dejar aquellos modelos en las respectivas jefaturas provinciales de obras públicas ya que no había sitio en la Escuela, tanto que el museo hubo de cambiar de locales dentro del propio edificio y subir al piso segundo, cediendo el Director que tenía allí vivienda sus habitaciones particulares, «donde hoy está instalado, hasta tanto pueda disponerse de local más amplio, que permita ordenar y clasificar los objetos». Por entonces, cuando se están haciendo diferentes proyectos para ampliar la Escuela, donde el museo y diferentes laboratorios tuvieran cómoda cabida, se planteó también como imperiosa necesidad la de «construir un edificio destinado a Museo Nacional de Obras públicas, al modo del que tenía la École Nationale des Ponts et Chaussées en París, y reducir el de la Escuela a un Museo ceñido a los modelos destinados a la enseñanza».

Pese a la falta de espacio el museo no dejó de ingresar nuevas piezas, de tal modo que en el curso 1908-1909, se incorporaron, además de los veinticuatro modelos de las obras del Canal de Aragón y Cataluña[29], que se mencionan más adelante, otros cinco modelos de cubiertas de cinc, regalados por la Real Compañía Asturiana; un modelo de la cimbra del puente de la Princesa sobre el Manzanares, regalado por la Maquinista Terrestre y Marítima; los modelos del puente metálico sobre el río Carrión, en Palencia, y del de hormigón armado de Alfonso XIII, en Canarias, obsequio de la Dirección General de Obras Públicas. Además, se adquirió un modelo de máquina de vapor, sistema Sulzer.



FIG. 10 Pabellón del Ministerio de Fomento en la Exposición Regional Gallega (1909), celebrada en Santiago de Compostela. Sección de Puentes con los modelos prestados por la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. El primer modelo de la derecha responde a un arco del Puente Nuevo o Puente de Enrique Estevan, sobre el Tormes en Salamanca, proyectado en 1898 por el ingeniero Saturnino Zufiaurre Goicoechea. Iniciadas las obras en 1902 no se terminarían hasta 1913, es decir, el modelo aquí expuesto adelantaba la imagen aún no construida.

Para dar una idea de la riqueza reunida en el museo de la Escuela en estos años, cabe acudir a la reseña de la visita que hizo a la Escuela, en 1910, el Director General de Obras Públicas, Javier Gómez de la Serna, donde se mencionan los «modelos de puentes del Grado en el Cinca, el ya mencionado de las Guarrizas, de Isabel II, de Almaraz, de Renedo, de Encinas, de Aguasfrías, acueducto de la Sima y de Colmenarejo, de Canero, de Ribadesella, del puente Victoria, del Carrión, de Alfonso XIII en Canarias, del Ulla, del Tambre, del Miño, del Sil, de la Pompeya, del río Deza, del de la Barca de Sampayo, de la Toja, del Tormes en Congosto y en Salamanca… entre los que apuntamos al pasar», comenta el autor de la reseña[30].

La sola relación de estos puentes abre nuevas vías de estudio pues unos, como el acueducto de la Sima (hoy en las instalaciones del Canal de Isabel II), los conocemos y reconocemos, milagrosamente salvado este de la dispersión y probable destrucción después de la Exposición Iberoamericana de Sevilla de 1929, donde se expuso un número importante de modelos relativos al Canal de Isabel II en un espacio propio, y que se debería hacer lo posible por rastrear y hallar los restos de aquella pérdida. Otros modelos, como el puente de Encinas (Salamanca) que se menciona de pasada, no debe ser otro sino el que se conserva actualmente en la Escuela, también de una forma milagrosa porque es muy antiguo, probablemente de 1846 cuando se termina la obra del puente, proyectado y construido por el «Ingeniero en Gefe» Ramón del Pino, sobre el Tormes en la carretera general de Villacastín a Vigo, «a expensas de la provincia de Salamanca». Seguramente este es el único documento a nuestro alcance no solo para conocer estos aspectos del puente de Encinas, ya desaparecido y que incluiría el nombre del constructor del modelo: «este modelo lo construyó el artista Álvaro Yglesias natural de Salamanca», sino que desde el punto de vista constructivo y didáctico ofrece la posibilidad de ver en tres de sus seis tramos el orden de construcción sobre los arcos escarzanos de madera de cer-

chas curvas, de un modo progresivo como gustaba hacerlo en los modelos del siglo XVIII y primera mitad del siglo XIX. Ahí residía su valor didáctico. El puente tenía en origen seis vanos, de unos 25 metros de luz, con cinco pilas de piedra y dos estribos, pero una riada en 1855 demostró la insuficiencia de desagüe del puente y se planteó un nuevo puente de piedra que no prosperó, precisamente por un informe del propio Ramón del Pino. Finalmente se optó por ampliar el cauce aumentando el número de pilas hasta ocho y con nueve tramos entre los estribos de veinticinco metros que ahora, en lugar de madera o arcos de piedra, llevaría unos tramos metálicos con un importante ahorro económico por el coste del material y tiempo empleado[31].

Terminaremos recordando que en la sección del museo dedicada a los puertos se veían los modelos de los diques y nuevo rompeolas del puerto de Barcelona, ya citado; el de un dique de carena; el dique del puerto de Cartagena; un descargadero de básculas (tipping) del puerto del Grao de Valencia; el plano en relieve del puerto de San Sebastián; el dique del Oeste y muro-muelle del puerto de San Esteban de Pravia; cargaderos para minerales, etcétera. Allí estaban también los modelos de los pantanos aragoneses de Cueva Foradada (muros-ataguías de hormigon para la fundación de la presa y detalle de un cajón para su construcción), Mezalocha (presa, aliviadero de superficie, obras accesorias y detalles de los desagües de fondo) y el modelo del pantano oscense de Santa María de Belsué (presa y detalles de las galerías y mecanismo de maniobra).

El canal de Aragón y Cataluña[32], inaugurado en 1906, donde se empleó el hormigón armado y en masa, en momentos muy delicados y con cierto temor sobre este material tras el hundimiento del tercer depósito del Canal de Isabel II (1905), contaba con una importante serie de modelos en los que aparecían representados la presa de derivación y toma de agua; el túnel artificial para salvar el paso detrítico de Gorgafonda; desagüe del canal principal y entrada del sifón del Sosa; vertedero y desagüe en el salto de Agua salada; paso superior en el canal de Zaidín; tipo de alcantarilla elíptica para desagüe; arco del puente-sifón del Sosa y disposición del desagüe de los tubos del sifón; cajero sobre el acueducto de la Coma de Capdevilla; rápido y salto en la bajada de la divisoria en el monte de Alfagea; tubo del sifón de Albelda y su desagüe; modelos de toma de agua para riego, de compuerta de riegos y mecanismo de maniobra; acueducto de Coll de Foix; cauce de Binaced; modelos de pasos superiores; rápido del canal de Escarpe; almenara del canal de Zaidín en la toma de agua de la acequia de Valcarca; cajero sobre palizada en el valle del Nou; acueducto de Montreal; entrada al túnel de la Almunia… Es decir, todo un mundo de modelos sobre una obra coetánea que demandaban el gran espacio que nunca llegó a tener el museo de la Escuela, por lo que creo que se devolvieron buena parte de ellos y/o se destruyeron. Pongamos el ejemplo del modelo del Sifón del Sosa, varias veces citado, que nos consta que estuvo en el museo de Caminos sin la menor duda en 1910 y que previamente había figurado en la Exposición Hispano-Francesa de 1908, pero que hoy se conserva en Monzón (Huesca), en el Centro de Interpretación del Canal de Aragón y Cataluña.

Detenemos aquí este apretado recorrido sobre un museo que, como recuerda Sáinz Ridruejo, prácticamente desapareció al jubilarse su director y responsable, el mencionado Ricardo Boguerín, quedando el museo «incomprensiblemente, vinculado al Laboratorio de Electro-Mecánica»[33], que en el curso 1915-1916 estrenaba nuevos locales. Faltaba

tan solo una última prueba, la mudanza al edificio que actualmente ocupa en la Ciudad Universitaria desde el curso 1968-1969, donde la colección de modelos ya no tiene entidad como tal colección y su museo prácticamente se disolvió en su actual fragmentación, pero donde hoy se advierte una nueva sensibilidad hacia ellos por parte de la Biblioteca del centro y del profesorado del mismo.

NOTAS

1. VV. AA., 2015.
2. FROMMEL, 2015.
3. La Fundación Juanelo Turriano tiene programada para la primavera de 2017 una exposición sobre «Maquetas y modelos históricos: ingeniería y construcción», en la que aborda esta cuestión.
4. BARRAULT, 1857.
5. [TRESCA], 1855, p. 595.
6. VALLE, ECHEVARRÍA y MENDIZÁBAL, 1855.
7. *Exposition Universelle à Philadelphie*, 1876.
8. LEMOINE y MESQUI, 1991.
9. BARON, 1873, p. XII. En la *Revista de Obras Públicas* apareció dos años después una traducción parcial del texto introductorio de Baron, en un artículo que llevaba el título de «Escuela Nacional francesa de puentes y calzadas» (1875, pp. 212-216 y 223-228).
10. *Exposition Universelle à Paris*, 1878, p. 418.
11. http://en.enpc.fr/en/node/12506.
12. [GONZÁLEZ TASCÓN], 1996.
13. CHATZIS, GOUZÉVITCH y GOUZÉVITCH, 2009.
14. Carta de Agustín de Betancourt desde París a su padre (6-3-1789), publicada en CIORANESCU, 1965, p. 21.
15. RUMEU DE ARMAS, A., 1990, pp. 87-88.
16. MUÑOZ, 1995.
17. TEIJELO, 2002-2003.
18. MADOZ, 1847, p. 821.
19. C(ARVAJAL), 1854.
20. *Reseña histórica*, 1873, pp. 33-34.
21. GONZÁLEZ DE LA VEGA, 1863.
22. AGUILAR, 2015.
23. *Gaceta de Madrid*, 30 de agosto de 1908.
24. «Exposición hispano-francesa...», 1908a.
25. *Anuario*, 1909, pp. 14 y 72-74.
26. CODERCH, 1907.
27. «Una visita...», 1908.
28. La plaza de «Artífice del Museo» estaba dotada 1901 con 1.500 pesetas anuales, y se cubría tras la pertinente oposición convocada en la Gaceta de Madrid. Los ejercicios tenían un carácter exclusivamente práctico y el jurado lo componían tres profesores de la Escuela. *Vid*. *Gaceta de Madrid*, 7 de noviembre de 1901, pp. 565-566.
29. «Exposición hispano-francesa...», 1908b.
30. «Escuela Especial...», 1910.
31. VALLE, MARTÍ y MAYO, 1865.
32. IBARZ, 2005.
33. SÁENZ RIDRUEJO, 2016, p. 258.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, I. (2015), «Lucio del Valle y la Exposición Universal de París de 1867», en *Lucio del Valle (1815-1874). Ingeniería y fotografía*, Madrid, Demarcación de Madrid del Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Cátedra Demetrio Ribes UV-CITMA, Fundación Juanelo Turriano, pp. 130-152.

Anuario de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Ministerio de Fomento, 1909.

BARON, H. (1873), *École nationale des ponts et chaussées. Catalogue descriptif des modèles, instruments et dessins des galeries de l'école*, París, Imprimerie Nationale.

BARRAULT, A. (1857), *Le palais de l'industrie et ses annexes, description raisonnée du système de construction en fer et en fonte adopté dans ces bâtiments*, París, E. Noblet.

C(ARVAJAL), F(RANCISCO) (1854), «Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos», *Revista de Obras Públicas*, nº 13, pp. 161-165.

CHATZIS, K., GOUZÉVITCH, D. y GOUZÉVITCH, I. (2009), «Betancourt et l'Europe des ingénieurs des "ponts et chaussées": des histoires connectées», en *Quaderns d'història de l'enginyeria*, vol. X, pp. 3-18.

CIORANESCU, A. (1965), *Agustín de Betancourt. Su obra técnica y científica*, La Laguna, Instituto de Estudios Canarios.

CODERCH SERRA, R. (1907), «Aparato Fabregat para la protección de pasos a nivel muy frecuentados», *Revista de Obras Públicas*, nº 55, pp. 206-211.

«Collection des instruments, maquettes et machines. École des Ponts et chaussées...» [http://en.enpc.fr/en/node/12506].

«Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Visita del SR. Director General de Obras Públicas» (1910), *Revista de Obras Públicas*, nº 58, pp. 171-181.

«Exposición hispano-francesa: Canal de Aragón y Cataluña» (1908a), *Revista de Obras Públicas*, nº 56, pp. 426-432.

«Exposición hispano-francesa: Canal de Aragón y Cataluña: varios de los modelos presentados» (1908b), *Revista de Obras Públicas*, nº 56, pp. 496-497.

Exposition Universelle à Paris en 1878. Notices sur les modèles, cartes et dessins relatifs aux travaux des ponts et chaussées réunis par les soins du Ministère des Travaux Publics, París, Imprimerie Nationale, 1878.

Exposition Universelle à Philadelphie en 1876. France. Notice sur les modèles, cartes et dessins relatifs aux travaux des pontes et chaussées... París, Imprimerie Nationale, 1876.

FROMMEL, S. (coor.) (2015), *Les maquettes d'architecture. Fonction et évolution d'un instrument de conception et de réalisation*, París, Picard.

GONZÁLEZ DE LA VEGA, C. (1863), «Locomotoras Tenders, sistema Vaessen, para fuertes pendientes y curvas de pequeño radio, construidas en la fábrica de San Leonardo (Lieja) y empleadas en el ferrocarril de Alar à Santander», *Revista de Obras Públicas*, nº 3, pp. 37-42.

[GONZÁLEZ TASCÓN, I.] (1996), Catálogo de la Exposición *Betancourt. Los inicios de la ingeniería moderna en Europa*, Madrid, CEHOPU.

IBARZ, A. (2005), *El canal d'Aragó i Catalunya: Cent anys d'esperança i de progrès*, Fraga, Institut d'Estudis del Baix Cinca.

LEMOINE, B. y MESQUI, J. (1991), *Un musée retrouvé. Le Musée des Travaux Publics. 1939-1955*, París, Imprimerie Nationale.

MADOZ, P. (1850), *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de Ultramar*, tomo X, Madrid, Imprenta del Diccionario Geográfico.

MUÑOZ JIMÉNEZ, J. M. (1995), «El Real Gabinete de Máquinas de Madrid según un inventario de 1814», *Bulletí de la Reial Acadèmia de Belles Arts de Sant Jordi*, IX, pp. 179-197.

Reseña histórica de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos desde su creación hasta 1873, Madrid, Imp. de Ribadeneyra, 1873.

RUMEU DE ARMAS, A. (1990), *El Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro*, Madrid, Fundación Juanelo Turriano. Se incluye la reproducción facsímil del catálogo del Gabinete que conserva la biblioteca del Palacio Real de Madrid.

SÁENZ RIDRUEJO, F. (2016), *Una historia de la Escuela de Caminos: la Escuela de Caminos de Madrid a través de sus protagonistas,* Madrid, Fundación Juan-Miguel Villar Mir y Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

TEIJELO, J. R. (2002-2003), «Aproximación al Real Conservatorio de Artes (1824-1850): precedente institucional de la ingeniería industrial moderna», *Quaderns d'Història de l'engyneria*, vol. V, pp. 45-65.

[TRESCA] (1855), *Visite a l'Exposition Universelle de Paris, en 1855*, París, Hachette.

«Una visita a la Exposición hispano-francesa de Zaragoza» (1908), *Revista de Obras Públicas*, nº 56, pp. 289-293.

VALLE, L., ECHEVARRÍA, R. y MENDIZÁBAL, A. DE (1855), *Apuntes sobre los objetos correspondientes al ramo de Obras Públicas presentados en la Exposición Universal de París*, Madrid, Imprenta Nacional.
VALLE, L. DEL, MARTÍ, V. y MAYO, A. (1865), «Proyecto de los tramos de hierro para el puente de Encinas sobre el río Tormes», *Revista de Obras Públicas*, nº 13, pp. 224-227.
VV. AA. (2015), *La maquette un outil au service du projet architectural*, París, Editions des Cendres (Cité de l'Architecture & du Patrimoine: Colloque international, París 20-21 mayo, 2011).

Volver al índice

6
Los puentes de piedra en la era de los ingenieros

LEONARDO FERNÁNDEZ TROYANO
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

LOS DOS PERIODOS DE LA HISTORIA DE LOS PUENTES

El libro de Jean Mesqui *Les ponts en France avant le temps des ingénieurs*, un clásico de los puentes de piedra, divide su historia en dos periodos: el de los anteriores a los ingenieros al que está dedicado el libro, y el de los posteriores a ellos. Nos referimos a los ingenieros como cuerpo profesional en Francia, que se separó del cuerpo de arquitectos.

Ingenieros ha habido desde los griegos diferenciados de los arquitectos, aunque no había una delimitación clara entre ellos. Eran los que hacían máquinas, fortificaciones y otros aparatos similares; paradigma de ellos es Arquímedes, el sabio de la Magna Grecia. El arte de construir estaba incluido en la arquitectura desde los romanos, como quedó bien definido en el tratado de arquitectura de Vitruvio, que en su capítulo III define las distintas partes de la arquitectura, que son la construcción, la gnómica o fabricación de relojes de sol, y el montaje de las máquinas. La construcción incluye todo tipo de obras, públicas y privadas.

Los tratados más conocidos del Renacimiento, el de Leon Battista Alberti del siglo XV y el de Andrea Palladio del siglo XVI, son también tratados del arte de construir con una amplitud análoga al de Vitruvio.

Ilustre ejemplo de ingeniero del Renacimiento fue Leonardo da Vinci, que se definió a sí mismo como ingeniero militar ante Ludovico Sforza en el siglo XV, y luego dijo que en tiempo de paz podía, como arquitecto, construir edificios públicos y privados, o conducir agua de un lugar a otro. En términos análogos se expresó Galileo Galilei en el siglo XVII al dirigirse al secretario del duque de Toscana, donde se refiere a su gran cantidad de inventos «tan útiles como dignos de curiosidad y admiración, que tan solo el exceso

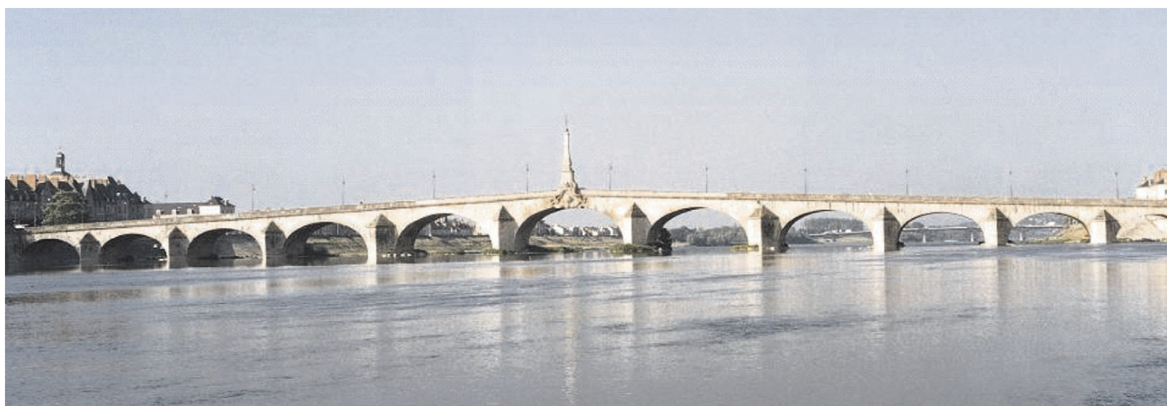


FIG. 1 JACQUES V GABRIEL, Puente Jacques Gabriel sobre el Loira, Blois, siglo XVIII.

me perjudica».

Desde el Renacimiento las distintas técnicas se van complicando y cada vez va habiendo más ingenieros o arquitectos con un grado de especialización mayor, hasta el siglo XVIII en que se produjo la disociación institucional de las dos profesiones. En 1716 se creó en Francia el cuerpo de Ingenieros de Ponts et Chaussées, que se disoció del de Arquitectos al Servicio del Rey. El primer ingeniero director fue Jacques V Gabriel, arquitecto de origen, hijo de Jacques IV Gabriel también arquitecto real, que construyó el Pont Royal sobre el Sena en París; este puente sirvió de modelo a muchos de los que se construyeron en Francia durante el siglo XVIII. De Jacques V Gabriel es el puente sobre el Loira en Blois, una de las composiciones más perfectas en lomo de asno con arcos de luces decrecientes del centro a los extremos; se puede considerar el principio de los puentes en la era de los ingenieros [FIG. 1].

En 1747 se fundó la escuela de Ponts et Chaussées de París cuyo primer director fue el ingeniero francés, nacido en Ginebra, Jean-Rodolphe Perronet que, como veremos, fue fundamental en la evolución de los puentes de piedra.

En España, cincuenta años más tarde, Agustín de Betancourt siguió un proceso parecido al francés. Formado en la escuela de Ponts et Chaussées de París, Betancourt creó en 1799 la Inspección General de Caminos y Canales, y en 1802 fundó la escuela del mismo nombre en Madrid.

Si bien hemos partido de una división de la historia de los puentes definida por el origen de la profesión de los ingenieros, pensamos que la división en dos periodos más adecuada de su historia se debe hacer por sus materiales, que dieron lugar a distintos tipos de puentes: el primer periodo es el de los puentes de piedra y madera, y el segundo el de los puentes metálicos y de hormigón. El primero cubre la mayor parte de la historia, desde los romanos hasta finales del siglo XVIII, y el segundo desde esas fechas hasta el día de hoy.

El primer periodo se caracteriza por el uso de materiales que podemos llamar naturales porque se extraen directamente de la naturaleza, y desde los orígenes de la historia se han podido obtener en las cantidades necesarias que requiere la construcción de puentes. Se caracteriza por la invariabilidad de las técnicas utilizadas para construir puentes durables: la bóveda cilíndrica de dovelas yuxtapuestas de piedra adquirió tal perfección

con los romanos, que los desarrollos posteriores fueron limitados. Puentes de madera se construyeron muchos en este primer periodo, más que de piedra, pero salvo en algunos países, se han considerado siempre provisionales.

El segundo periodo se caracteriza por el uso de materiales artificiales que requieren una transformación en fábrica de los componentes naturales. Estos materiales son el hierro fundido, el hierro laminado, el acero y el hormigón, que dieron lugar a los distintos tipos de puentes. Este periodo se puede considerar el polo opuesto del anterior; se caracteriza por la diversidad de tipos de estructuras y de materiales, y por la potencia de su evolución y desarrollo. Desde el primer puente metálico, el arco de Coalbrookdale de 30 m de luz construido en 1774, y origen de este segundo periodo, hasta el puente del Firth of Forth de 521 m terminado en 1890, el de mayor luz del siglo XIX, transcurre poco más de un siglo.

En ambas clasificaciones que hemos visto: según los materiales o según la era de los ingenieros, el segundo periodo se inicia en el siglo XVIII, y sin embargo en él se siguieron haciendo puentes de piedra en gran cantidad, aunque se pueden considerar anacrónicos porque es el tiempo de los puentes metálicos y los colgantes. Se da además la paradoja de que en el siglo XVIII, a finales del primer periodo o principios del segundo, los puentes de piedra tuvieron su mayor evolución.

LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES DE PIEDRA POR LOS INGENIEROS

Jean-Rodolphe Perronet, fundador de la École nationale de Ponts et Chaussées de París, fue el gran innovador de los puentes de piedra. Se puede considerar el primer ingeniero moderno, con mentalidad análoga a los ingenieros del siglo XIX. Además de proyectar y construir once puentes en los que introdujo innovaciones significativas, sus aportaciones teóricas al cálculo de las bóvedas fueron importantes en su momento.

Su primera innovación consistió en reducir el ancho de las pilas, mediante la compensación de los empujes de los dos arcos que llegan a cada una de ellas, de forma que si estos dos arcos son iguales, la resultante del peso propio sobre la pila es vertical, y por tanto solo habrá descompensación de empujes para las cargas de tráfico asimétricas. Con este planteamiento redujo el ancho de las pilas desde 1/5 de la luz de los arcos a 1/10; 1/5 era el valor recomendado por Alberti en el siglo XV y todavía se aplicaba a mediados del siglo XVIII.

Compensar en las pilas los empujes de peso propio de los arcos planteaba problemas; el principal es que había que descimbrarlos simultáneamente para evitar la descompensación de empujes durante la operación; por ello el descimbrado se llegó a convertir en un espectáculo; Luis XV asistió al del puente de Neuilly sobre el Sena.

Perronet transformó todos los elementos de los puentes de piedra, lo que dio lugar a cambios significativos de su fisonomía:

a) Como hemos visto, disminuyó el ancho de las pilas, y en algunos puentes cambió la forma tradicional de las pilas, formadas por un tabique del mismo ancho de la bóveda, y las sustituyó por columnas aisladas.
b) Aumentó considerablemente el rebajamiento de los arcos, llegando en el puente

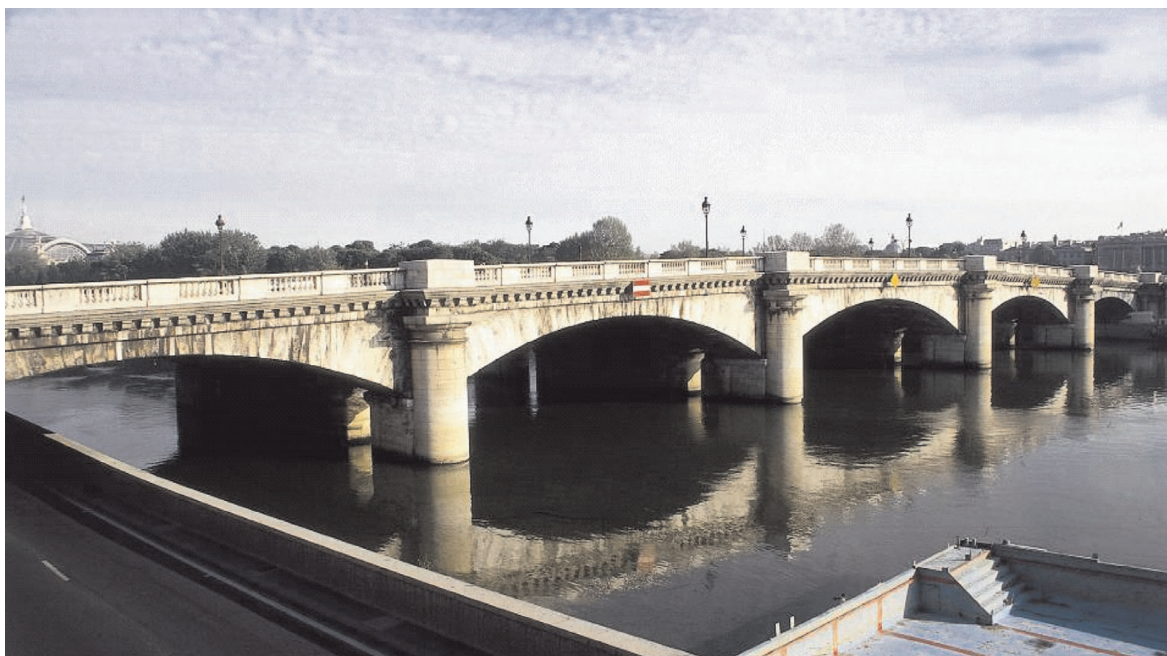


FIG. 2 J.- R. PERRONET, Puente de la Concorde sobre el Sena en París, 1791.

de Nemours a 1/15 de la luz, valor difícilmente superable en arcos de piedra.

La silueta de los puentes más rebajados de Perronet, como el de Nemours, se puede confundir con la de los puentes en viga continua de hormigón armado de canto variable, construidos casi dos siglos después.

La última de las grandes obras de Perronet es el puente de la Concorde sobre el Sena en París, con cinco arcos de 25 a 31 m de luz, uno de los clásicos puentes de París. Se terminó en 1791, y en 1927 se ensanchó de los 15 metros que tenía inicialmente, a un total de 35, respetando la idea original de Perronet [FIG. 2].

Los puentes de Perronet crearon escuela; después de él se construyeron muchos análogos a los suyos, y no solo en Francia, sino también en todos los países de su entorno. En España la mayoría de los puentes de piedra del siglo XIX y principios del XX son de este tipo: arcos escarzanos rebajados, pilas estrechas formadas por tabiques con el mismo ancho de las bóvedas, rematados en ambos paramentos por medios cilindros que sirven de tajamares y espolones.

Uno de los puentes españoles de piedra más conocido del siglo XIX es el del río Cabriel en la carretera de Madrid a Valencia por las Cabrillas, proyecto de Lucio del Valle, uno de los ingenieros españoles más brillantes del siglo XIX. Es un puente grande entre los decimonónicos de piedra, pero no entendemos el motivo de tantos elogios que se le han dedicado, probablemente debidos a la personalidad de su autor. Pensamos que su encaje en el cauce no es afortunado porque la luz del arco principal es pequeña para las dimensiones del río.

Otro puente a destacar entre los de piedra es el de Logroño sobre el río Ebro, con siete arcos elípticos de 21,5 a 31,5 m de luz; sustituyó al puente medieval de San Juan de Ortega.

En el siglo XIX, el gran siglo de los puentes, los de piedra perdieron el protagonismo



FIG. 3 T. TELFORD, Puente Over sobre el río Severn cerca de Gloucester, 1827.

que habían tenido hasta entonces, que pasó a los metálicos y colgantes; sin embargo, durante este siglo e incluso en el primer cuarto del XX, se construyeron muchos puentes de piedra, porque esta solución siguió siendo válida. En Inglaterra, los ingenieros del siglo XIX, a los que se debe fundamentalmente el nacimiento y desarrollo de los puentes metálicos, dominaban en general todas las técnicas y por ello construyeron puentes metálicos, de piedra, y de madera.

Thomas Telford, uno de los ingenieros más brillantes de todos los tiempos, cuyo nombre estará siempre asociado al desarrollo inicial de los puentes metálicos y de los colgantes, construyó muchos de piedra, algunos de ellos de gran envergadura. Telford, escocés de origen humilde, empezó su vida profesional como cantero, y esto le llevó a hacer puentes de piedra singulares. El primero es el de Montford sobre el río Severn, terminado en 1792, con tres arcos elípticos de 17,6 m de luz el central. Sus puentes de piedra más destacados son los viaductos altos con pilas extraordinariamente delgadas. En primer lugar el de Cartland Craigs sobre el río Mouse en Lanarkshire, terminado en 1822, con tres arcos de 23 metros de luz; las pilas tienen 39,5 m de altura. El siguiente es el puente Dean en Edimburgo, terminado en 1831; tiene cuatro arcos de 27,5 m de luz y pilas de una altura de 40 metros. El arco de piedra de mayor luz que construyó Telford es el puente Over cerca de Gloucester sobre el río Severn, un arco elíptico de 45,7 m de luz, terminado en 1827 [FIG. 3].

John Rennie, también de origen escocés y coetáneo de Telford construyó tres puentes sobre el Támesis en Londres, dos de piedra, el de Waterloo y el London Bridge, y uno metálico, el de Southwark. El de Waterloo, terminado en 1817, tenía nueve arcos carpaneles de 36 m de luz con pilas de 6 m de ancho; fue sustituido en 1938 por el actual Waterloo, una viga continua de hormigón armado.

El London Bridge sustituyó al medieval, que se encontraba en muy malas condiciones. El puente tenía cinco arcos carpaneles de luces variables; la mayor, la central, de 45,6 m, y las menores, las extremas, de 39 m; se terminó en 1831. Se ensanchó en 1904 y se sustituyó en 1973 por una viga continua metálica. El puente de piedra se vendió a un norteamericano que lo reconstruyó en la ciudad de Lake Havasu, Arizona, en 1971.

En 1832 se terminó el puente Grosvenor en Chester sobre el río Dee, con un arco es-



FIG. 4 Pont du Gard sobre el Gardon para el abastecimiento de agua a la ciudad de Nîmes.

carzano de 61 metros de luz, construido por Thomas Harisson; este puente fue el arco de piedra de mayor luz (exceptuando el desaparecido puente medieval de Trezzo de 70 m de luz), hasta que Séjourné construyó el puente ferroviario de Lavaur sobre el río Agout en 1884, con una luz de 61,5 m.

El nuevo medio de transporte del siglo XIX, el ferrocarril, dio lugar a un nuevo tipo de puente: el viaducto de gran altura y longitud, debido a que los trazados ferroviarios son más exigentes que los carreteros, tanto en alzado como en planta. En los viaductos ferroviarios se utilizaron todas las técnicas y materiales conocidos en el siglo XIX: la piedra, la madera y el hierro. La rápida expansión del ferrocarril obligó a construir muchos viaductos de los tres materiales, generando un avance significativo en los puentes. Los grandes viaductos de ferrocarril de piedra construidos en ese siglo son unas magníficas obras de ingeniería que deben tener su lugar en la historia de los puentes, aunque ya no era su tiempo. En los de gran altura se tuvieron que abordar de nuevo los problemas que se habían planteado los romanos en los grandes acueductos, lo que nos lleva a obras anteriores a la era de los ingenieros. Los romanos resolvieron el problema inicialmente superponiendo un puente sobre otro hasta llegar a la altura del canal. Así se hizo en el Pont du Gard sobre el río Gardon para el abastecimiento de la ciudad de Nîmes, una de las obras más famosas de los romanos, que debía pasar a 47 m de altura sobre el río [FIG. 4]. También fueron obras superpuestas los dos niveles de los acueductos de las Ferreras en Tarragona y de Segovia, para los abastecimientos de Tarraco y Segovia, de 26 y 29 m de altura. En ellos las pilas van ganando importancia y continuidad, y las luces de los arcos se reducen. En el tercero de los grandes acueductos españoles, el de los Milagros en uno de los abastecimientos de la ciudad de Mérida, las pilas tienen continuidad vertical, enfatizada con el nervio que las recorre de arriba abajo; los tres niveles de arcos se convierten en arriostramientos entre pilas que es realmente su misión.

Un proceso análogo se siguió en los viaductos de piedra del siglo XIX en los que se



FIG. 5 LÉON BOYER, Viaducto sobre el río Crueize, 1880.

utilizaron soluciones parecidas; en el acueducto de Roquefavour cerca de Aix, Francia, se copió la composición del Pont du Gard con dimensiones distintas: su altura máxima es de 82 m; se terminó en 1847.

El arriostramiento de las pilas mediante arcos a varias alturas se utilizó con frecuencia, sobre todo en los primeros viaductos; se llegó incluso a cuatro niveles de arcos en el viaducto del río Göltzsch en Vogtland, Alemania, terminado en 1851; este viaducto tiene 578 m de largo y pilas de 78 m de altura. El viaducto de Chaumont en Francia, en la línea París-Mulhouse, de 600 m de largo y altura máxima sobre el fondo del valle de 49,5 m, tiene tres niveles de arcos. Dos niveles tiene el viaducto de Morlaix también en Francia, de 62 m de altura máxima y arcos de 15,5 m de luz.

Los arcos de arriostramiento intermedios se terminaron abandonando, y por tanto las pilas quedaron exentas en toda su altura y dieron lugar a algunos de los puentes de piedra más hermosos que se han construido. Entre ellos el de Port Launay sobre el río Aulne con una altura de 55 m, arcos de 22 m de luz, y 357 m de longitud, terminado en 1866. El viaducto sobre el río Crueize en el barranco del Infierno tiene 218 metros de longitud, altura máxima de 63 m y luces de 25 m; se terminó en 1880 con proyecto de Léon Boyer, uno de los grandes ingenieros franceses del siglo XIX [FIG. 5]. Boyer fue, junto con Gustave Eiffel, el autor del proyecto del viaducto de Garabit sobre el río Truyère.

Uno de los viaductos más conocidos y más impresionantes de este tipo es el de Landwasser, sobre el río del mismo nombre, cerca de Filisur, Suiza; este viaducto, además de su gran altura, tiene una curva en planta muy pronunciada; se construyó en 1902. En la misma línea se encuentran dos puentes con arcos de piedra de luces importantes: el de Solis sobre el río Abula, de 47 m de luz y a una altura sobre el fondo de la garganta de

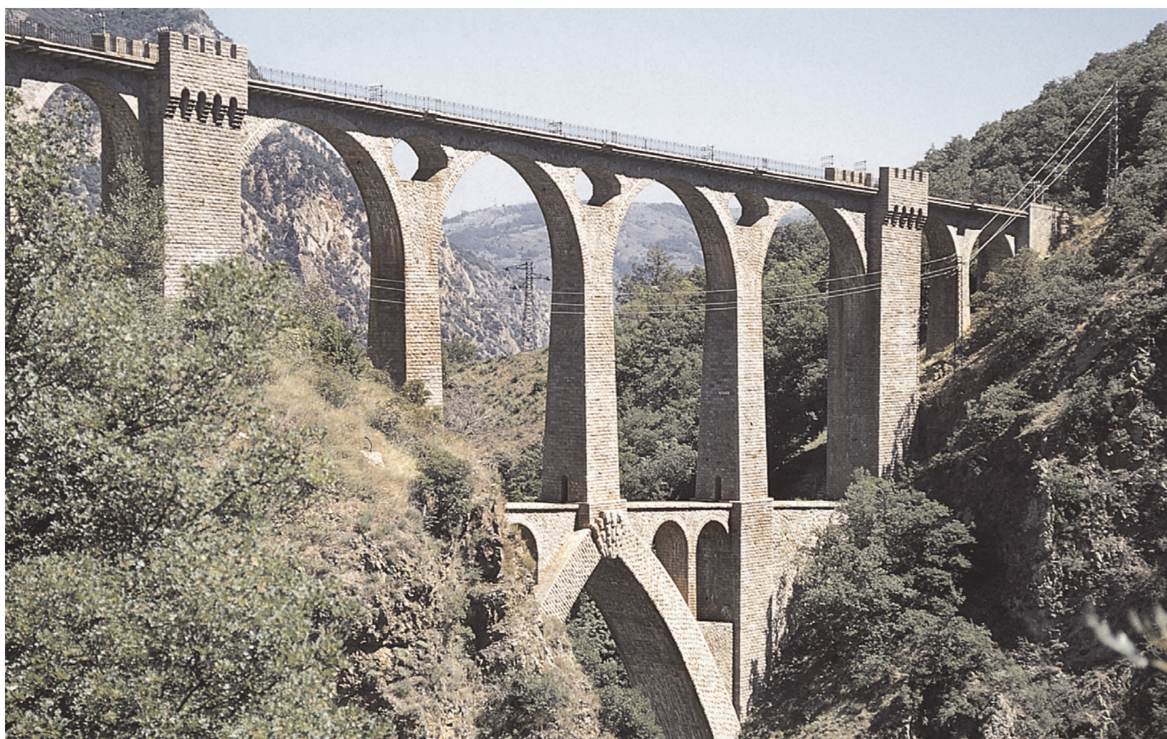


FIG. 6 P. SÉJOURNÉ, Viaducto de Fontpedrouse sobre el río Tet, Pirineos, 1908.

86 m, construido en 1903; y el de Wiesen, sobre otra garganta del río Landwasser, con una luz de 55 m, terminado también en 1903.

En España también se construyeron viaductos de piedra de este tipo, especialmente en los ferrocarriles de vía estrecha del Cantábrico. Unos de los mayores y mejores son el de la ría del Esva, y el de Artedo sobre el río Uncín, parecido al anterior. Son viaductos de pilas altas del tipo del de Port Launay con arcos de 22 m de luz, construidos en 1866.

Esta versión de los grandes viaductos de piedra sin arcos intermedios nos lleva a una comparación con los puentes anteriores a la era de los ingenieros, y el único que hemos encontrado comparable a ellos es el puente romano de Alcántara sobre el río Tajo, un puente excepcional que se adelantó a su época y por ello no creó escuela; es solo comparable a estos grandes viaductos del siglo XIX, aunque es un puente *sensu stricto* porque la altura de su rasante está definida por el nivel que alcanza el río en máximas avenidas, que puede subir del orden de 30 m sobre su nivel normal.

Se puede decir que el último de los grandes ingenieros constructores de puentes de piedra en Europa fue el francés Paul Séjourné (1851-1939). De entre sus realizaciones hay que destacar, además del ya citado puente de Lavaur sobre el río Agout, con 61,5 m de luz, el puente Adolphe sobre el río Pétrusse en Luxemburgo con 84,60 m de luz, formado transversalmente por dos anillos, unidos con un tablero de hormigón armado, terminado en 1903 y que fue el mayor arco de piedra hasta que en 1905 se terminó el puente de Plauen en el valle de Syra en Alemania, un arco elíptico de 90 m de luz, con un rebajamiento de 1/5,5, que ha sido a su vez el mayor arco de piedra hasta los recientes puentes chinos. Otro de los grandes puentes de Séjourné es el puente de los Amidonniers, también llamado de los Catalanes, sobre el río Garona en Toulouse, con cinco arcos elíp-

ticos; el mayor, el central, tiene una luz de 46 m; transversalmente su ancho es de 22 m de luz, y lo resolvió igual que en el puente de Luxemburgo; se terminó en 1911. Pero el más original y quizás el más conocido de los puentes de Séjourné sea el viaducto de Fontpedrouse sobre el río Tet en los Pirineos, con un arco ojival de 30 m de luz, que soporta en la clave una de las pilas del viaducto, formado por arcos de 17 m de luz; se terminó en 1908 [FIG. 6].

Los últimos puentes de Séjourné marcaron el final de los arcos de piedra en Europa. En la segunda mitad del siglo XX los chinos construyeron innumerables arcos de piedra, hasta que en el último cuarto del siglo iniciaron la construcción de puentes modernos y rápidamente asimilaron sus técnicas hasta llegar a ser en el momento actual una de las mayores potencias en la construcción de puentes de todo tipo, con varios récords de luz. En los arcos de piedra se alcanzaron grandes luces con morfologías, rebajamientos y esbelteces análogas a los de los puentes arco de hormigón armado. El arco de piedra mayor del mundo es el de Danhe en China, con una luz de 146 m, terminado en el año 2000, casi ya en el siglo XXI. También se hicieron de piedra puentes de varios vanos con arcos rebajados, con luces que llegaron a los 90 m.

LA PIEDRA EN LOS PUENTES MODERNOS

Además de los puentes y viaductos de arcos de piedra que, como hemos visto, se han seguido construyendo hasta el siglo XX, en los que se deben incluir las arcadas de piedra de acompañamiento de muchos viaductos metálicos, la piedra como material de construcción se siguió utilizando en los puentes modernos en las pilas de muchos de ellos hasta que se fueron imponiendo las pilas metálicas o de hormigón. Llamamos puentes modernos a los puentes metálicos y de hormigón del segundo periodo de su historia, no a los de la Edad Moderna.

Son innumerables los ejemplos de pilas de piedra, algunas de gran altura, como las del viaducto del Salado en la línea ferroviaria Linares-Almería, que tienen una altura del orden de 75 m. De piedra son también las pilas del viaducto de Ormaíztegui, del de Redondela y del puente de Tuy, algunas de las grandes obras metálicas del siglo XIX. O las del acueducto de Pontcysyllte sobre el río Dee en Gales, una de las primeras y mejores obras metálicas de Telford [FIG. 7].



FIG. 7 T. TELFORD, Acueducto de Pontcysyllte sobre el río Dee en el canal de Ellesmere, Reino Unido, 1805.

Las torres de los primeros puentes colgantes modernos fueron en su inmensa mayoría de piedra; así son las del

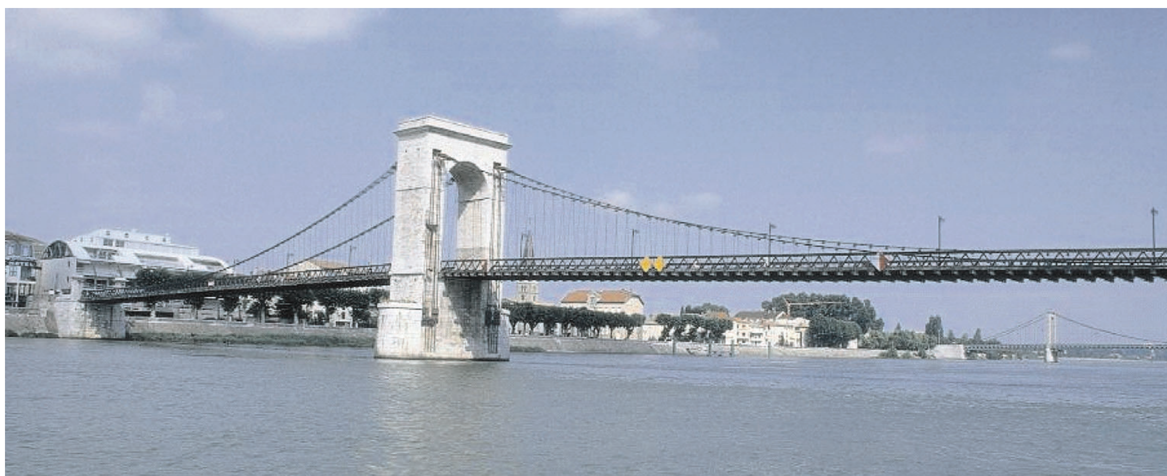


FIG. 8 Puente Tournon-Tain l'Hermitage sobre el Ródano, Francia.

Union Bridge de Samuel Brown, las del puente de Menai de Telford, las del puente de Clifton de Brunel, etc. Muchas de ellas, especialmente en Francia, se construyeron como pequeños arcos de triunfo [FIG. 8]; ejemplo de ello son las del puente de Valence sobre el Ródano de Marc Seguin; otras son templos o columnas egipcios como las del puente de Clifton de Brunel, o las del puente del Niágara de Roebling; y otras castillos medievales como las del puente de Conway de Telford, o las del Pont de la Caille en Francia.

En los grandes puentes colgantes de la segunda mitad del siglo XIX las torres de muchos de ellos seguían siendo de piedra. Buen ejemplo son las de los grandes puentes de Roebling: las del Niágara eran de inspiración egipcia, las de Covington-Cincinnati son arcos de triunfo, y las de Brooklyn, arcos ojivales. A principios del siglo XX la mayoría eran metálicas, aunque perduró la idea de las torres de piedra; prueba de ello es que en el puente de George Washington, terminado en 1931, las torres se proyectaron con la idea de forrarlas de piedra; pero esta idea se abandonó durante la construcción, entre otras razones por la depresión de 1929.

ACTUACIONES DE LOS INGENIEROS EN LOS PUENTES DE PIEDRA

Una de las misiones de los ingenieros es la gestión y conservación de las infraestructuras ya construidas, y en ellas se incluyen los puentes de piedra. Por ello los ingenieros han tenido que intervenir en los puentes de piedra de todas las épocas, de diferentes formas y no siempre con acierto. Estas intervenciones se plantean actualmente por dos motivos:

1. Como actividad de la ingeniería, porque es necesario intervenir en muchos puentes históricos para que sigan cumpliendo su función y se mantengan con la seguridad que se exige a los puentes en el momento actual.
2. Para conservar o recuperar sus valores monumentales, como parte del patrimonio histórico-artístico.

La reconstrucción o rehabilitación de los puentes no ha sido el único motivo que ha obligado a los ingenieros a actuar en los puentes de piedra; también ha sido necesario



FIG. 9 El Puente de Segovia en Madrid después del ensanche.

adaptarlos a las exigencias del tráfico que ha evolucionado a lo largo de la historia; esto los ha mantenido vivos, pero en muchas ocasiones han pagado por ello un alto precio.

Todo ello ha exigido intervenir en los puentes con el curso de los años. En un primer periodo, las técnicas que se utilizaban en las reconstrucciones eran las mismas que se habían usado en la construcción, y por eso, en general, se reproducía el puente existente con mayor o menor acierto. Sin embargo, en la era de los ingenieros, las técnicas para hacer puentes ya no eran las mismas; muchos puentes de piedra se han reconstruido con arcos de hormigón, y cuando se quería recuperar la fisonomía original, se chapaban de piedra los paramentos. Un ejemplo clásico de este proceder fue la reconstrucción del puente del Diablo sobre el río Llobregat en Martorell, con un arco apuntado de 32 m de luz, construido en el siglo XIII, volado durante la Guerra Civil y reconstruido en 1965 con un arco de hormigón. Los nuevos paramentos reprodujeron fielmente los originales, incluidos los frentes del arco, pero en el intradós de la bóveda quedó el hormigón a la vista.

La evolución del tráfico, tanto en lo que se refiere a las exigencias de trazado, como a las exigencias de mayor capacidad, ha obligado también a actuar en ellos. Con frecuencia ha sido necesario rectificar rasantes; son muchos los puentes con perfil de lomo de asno que lo han perdido en rectificaciones posteriores, lo que cambia su fisonomía. El aumento del tráfico que se produjo en el siglo XIX obligó a ensanchar muchos puentes, lo que se ha hecho de diferentes formas; en general, la solución más satisfactoria es el ensanche por traslado de un paramento y ensanche de la bóveda. Un ejemplo clásico de este sistema ha sido el ensanche del puente de Segovia en Madrid, en el que se trasladó uno de los paramentos, y se ensanchó la bóveda con hormigón [FIG. 9].

Esta intervención nos lleva a estudiar los dos puentes históricos principales de Madrid, el de Segovia, del siglo XVI, y el de Toledo, del siglo XVIII, en los que las mayores trans-



FIG. 10 PEDRO DE RIBERA, Puente de Toledo sobre el río Manzanares en Madrid, 1735, antes de la canalización del río.

formaciones se han debido a la canalización del Manzanares. Ambos se construyeron sobre un cauce divagante prácticamente horizontal que dio lugar a puentes de varios arcos prácticamente iguales en todo su ancho [FIG. 10]. La canalización transformó el cauce concentrándolo en un canal central y elevando el resto. Esta situación dejó desencajado el puente de Toledo, en el que quedaron dos pilas en los taludes del cauce y las demás semienterradas en los lados; en el puente de Segovia dejó casi enterrados muchos de sus arcos. Al ensanchar este puente, el ingeniero Vicente Olmo recuperó el cauce antiguo haciendo unos estanques laterales comunicados con el cauce principal, lo que devolvió al puente su fisonomía original.

Después del ensanche del puente de Segovia se planteó el del puente de Toledo, a lo que se opuso Carlos Fernández Casado argumentando que se trata de una estructura en tres dimensiones como corresponde al barroco. Propuso desdoblarlo con dos puentes, uno aguas arriba y otro aguas abajo, solución que se aplicó al construir la autopista del Manzanares. Lo que nunca se ha solucionado es el estropicio que hizo la canalización en este puente.

Pero el aumento de la capacidad de tráfico en los puentes no afectó únicamente a los ensanches. Muchos puentes que tenían torres en el centro o en sus extremos, las perdieron para aumentar el ancho. Así las perdió el puente de Zamora sobre el río Duero, con una torre en cada extremo; el del Arzobispo sobre el río Tajo con dos torres en pilas intermedias; o el de Besalú sobre el río Fluvià con una torre en una pila intermedia y otra en el borde del lado de la ciudad, que las recuperó cuando se reconstruyó después de la Guerra Civil en la que se habían derribado varios arcos.

Como hemos dicho, también se ha actuado en algunos puentes para recuperar o conservar sus valores monumentales. Un ejemplo clásico es la rehabilitación del puente de Alcántara llevada a cabo en el siglo XIX por el ingeniero Alejandro Millán. En ese momento, faltaba el segundo arco de margen derecha, derribado en 1810, durante la Guerra de la Independencia. La reconstrucción del arco y la rehabilitación de todo el puente efectuada por Millán se puede considerar modélica.

BIBLIOGRAFÍA

China's Stone Bridge, Shangai, People's Communications Publishing House, 1992.

FERNÁNDEZ CASADO, C. (1964), «Sobre el puente de Toledo», *Arquitectura,* octubre.

FERNÁNDEZ CASADO, C. (1974-1975), «Madrid y el Manzanares. El río, la ciudad y sus puentes», *Revista de Obras Públicas*, enero, septiembre y diciembre 1974 y marzo 1975.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. (2004), *Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los Puentes*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. (2006), «El Puente de Alcántara. Obra excepcional de ingeniería», en *El puente de Alcántara. Cayo Julio Lacer,* Madrid, Real Academina de Ingeniería.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. (2008), «La puente Segoviana y la puente Toledana», *Ingeniería Civil*, nº 143, julio, agosto y septiembre.

FERNÁNDEZ TROYANO, L. (2015), *Camino sobre el río. Historia de los puentes españoles*, Madrid, Sociedad Estatal Correos y Telégrafos, S. A.

GILLE, B. (1964), *Les ingénieurs de la Renaissance*, París, Herman.

MARE, E. (1975), *Bridges of Britain*, Londres, B.T. Batsford LTD.

MESQUI, J. (1986), *Les ponts en France avant le temps des ingénieurs*, París, Picard.

PRADE, M. (1986), *Les ponts monuments historiques*, Poitiers, Errance-Brissaud.

RUDDOCK, T. (1979), *Arch bridges and their builders 1735-1835*, Cambridge, Cambridge University Press.

SÉJOURNÉ, P. (1913), *Grandes voûtes*, Bourges, Vve Tardy-Pigelet et fils.

WHITNEY, C. S. (1983), *Bridges, their Art, Science & Evolution*, Nueva York, Greenwich House.

Volver al índice

7
La Fundación Santa María la Real

JUAN CARLOS PRIETO VIELBA
Arquitecto
Director General de la Fundación Santa María la Real

INTRODUCCIÓN

La Fundación Santa María la Real - Centro de Estudios del Románico se crea en el año 1994 como evolución de la Asociación de Amigos del Monasterio de Aguilar, entidad que desde sus orígenes vislumbró la idea de que el patrimonio era un recurso de los pueblos y que como tal podía generar riqueza y ser importante fuente de empleo.

Desde la Fundación Santa María la Real entendemos que la adecuada conservación, gestión y fomento del patrimonio, en su sentido más amplio, requiere iniciativas originales que puedan convertirse en catalizador de un marco de crecimiento sostenible.

Para cumplir este objetivo se ha de abordar esta gestión desde una amplia perspectiva que implica tanto la investigación, la innovación, la conservación y restauración, la promoción y difusión, así como también la creación de un tejido empresarial y de infraestructura turística que permita aprovechar todas las potencialidades del territorio.

Entendemos que es en la buena gestión de ese patrimonio donde debe ponerse el acento para poder descubrir las ventajas que cada ámbito territorial ofrece y aprovechar sus recursos propios.

Es por ello por lo que desde los inicios de su actividad la Fundación Santa María la Real ha desarrollado distintas líneas de actuación en consecuencia con esta filosofía que entiende el patrimonio, en toda su expresión, como un recurso de desarrollo socioeconómico.

HISTORIA DE LA INSTITUCIÓN

Todo parte –allá por 1977– de la rehabilitación del Monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo, que, por su carácter de ruina, exigía enormes esfuerzos. Hacía falta buscar un uso y José María Pérez («Peridis»), hoy Presidente de la Fundación Santa María la Real, lo encontró: el monasterio albergaría un Instituto de Bachillerato y el Ministerio de Educación financiaría el grueso de la obra. Así fue, y los alumnos del curso 1984-85 inauguraron la segunda etapa de los muros de Santa María como centro formativo. Pero la idea de recuperación no se quedó ahí y se produjo entonces la segunda confluencia de intereses, naciendo el programa de Escuelas Taller del INEM, creado a mediados de los años ochenta y que atendía al preocupante desempleo juvenil procurándole una formación en oficios ligados a la restauración del patrimonio monumental. Desde el nacimiento del programa hasta el año 2000, la Fundación ha gestionado 13 proyectos de Escuelas Taller, Casas de Oficios, Talleres de Empleo y Módulos de Promoción y Desarrollo. En octubre de 1985 inició su andadura la Escuela Taller «Asociación de Amigos del Monasterio» y con su concurso se completó la definitiva recuperación del edificio, que recibió la Medalla de Plata de la Asociación Europa Nostra de manos de la reina Doña Sofía en enero de 1988.

En estos años, junto a actividades artísticas y culturales y a la intervención directa en significativos monumentos, yacimientos arqueológicos y bienes de arte mueble, un equipo interdisciplinar empezó a trabajar en un proyecto que comenzó como un inventario de iglesias y bienes muebles románicos de Aguilar y su entorno, que a la postre acabó convirtiéndose en la *Enciclopedia del Románico en Castilla y León*. Las ambiciones y objetivos comenzaban a extenderse y como fruto nace la Asociación Cultural «Centro de Estudios del Románico», creada en 1988. Los pilares sobre los que se sustentaba, todos con el patrimonio monumental como bandera, eran tres: el educativo y social, el económico (fomento de la creación de iniciativas empresariales y de autoempleo para los alumnos del programa) y el cultural (cursos, publicaciones, inventario y estudio del patrimonio, Museo del Territorio, biblioteca especializada en la época medieval, restauración de bienes muebles e inmuebles).

Entre 1988 y 1994 se sientan las bases de lo que hoy es la Fundación Santa María la Real, adaptándose la estructura interna a la consecución de objetivos y el constante crecimiento. Tales aspectos materiales motivaron su transformación en Fundación Cultural de ámbito nacional y duración indefinida, ratificada en la carta fundacional de 24 de junio de 1994.

DEL MONUMENTO AL TERRITORIO. DE LA RESTAURACIÓN AL CONOCIMIENTO

El Centro de Estudios del Románico consideraba que en los últimos años la apreciación que los españoles tenían de su patrimonio cultural había dado un vuelco, y en gran medida gracias al papel socializador de las Escuelas Taller, que habían conseguido que cada pueblo, cada lugar, cada comarca estuviera orgullosa de su pequeña iglesia, de su torre, de su palacio o de su yacimiento arqueológico y se comprometiera en su conservación, pero que aún faltaba mucho por hacer. El patrimonio –salvo los monumentos

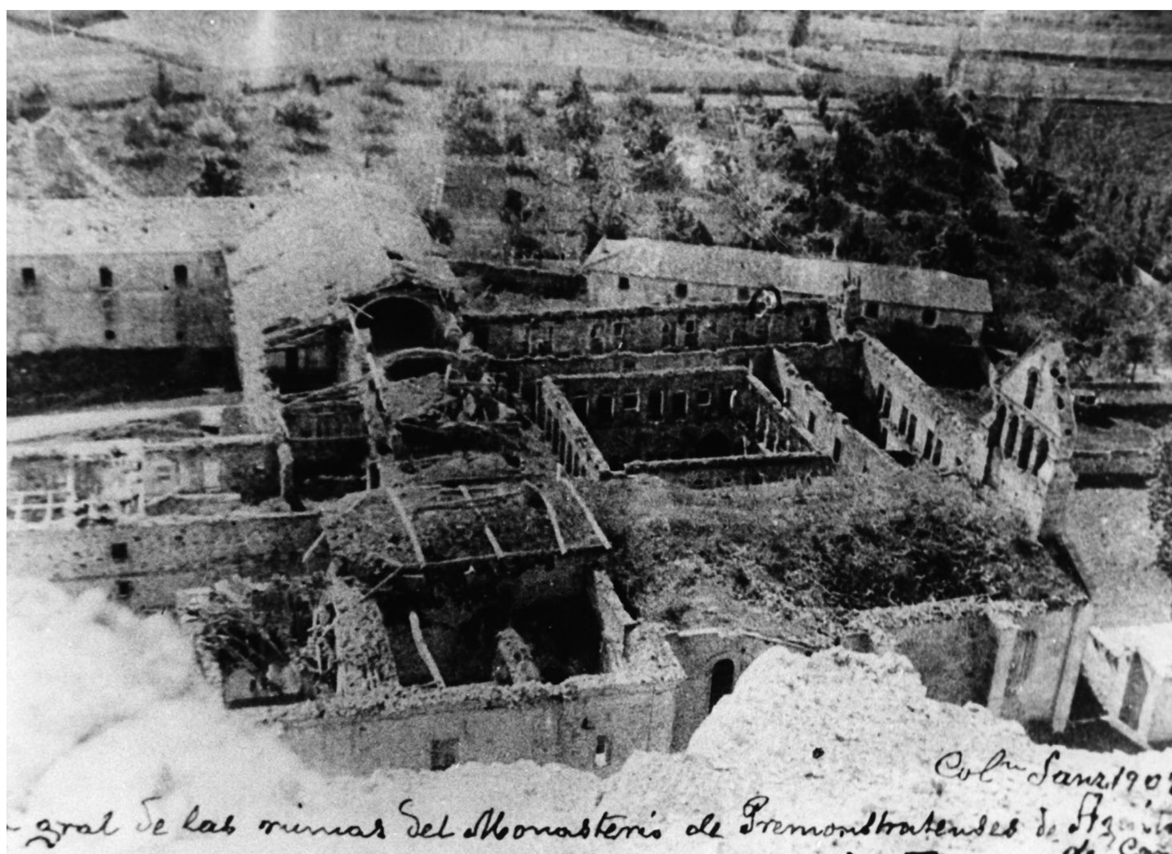


FIG. 1 *Vista general de las ruinas del Monasterio de Premonstratenses de Aguilar de Campoo*, 1908.



FIG. 2 Monasterio de Santa María la Real, Aguilar del Campoo. Fotografía de César del Valle.

de primera magnitud– seguía siendo en buena medida una materia prima que era necesario manufacturar para que el recurso creara dinamismo económico y empleo, y para ello era necesario plantearse una política a largo plazo que tuviera tres pilares: el conocimiento, la difusión y la explotación, aunque cada uno de esos pilares requería un planteamiento novedoso y una reflexión previa para ser conscientes del punto de partida y el camino a seguir, puesto que el punto de llegada, aun a día de hoy, apenas si somos capaces de intuirlo.

El conocimiento es sin duda el primer paso para trabajar sobre un elemento o una idea, ser conscientes de qué es lo que tenemos, de sus valores, de sus puntos fuertes y débiles, de sus amenazas y de las oportunidades que nos ofrece. Cuando hablamos de conocer el patrimonio cultural casi siempre se hacen planteamientos reduccionistas ya que nos centramos en el conocimiento histórico, documental o artístico, pero cualquier monumento, cualquier bien de interés cultural es un ente mucho más complejo, así, por ejemplo, hay que partir de el hecho de que se encuentra en determinado lugar, por lo que responde a unas circunstancias también medioambientales, tiene o ha tenido un uso –y en ocasiones diversos usos, como pueden ser muchos templos medievales, que son lugares de culto, a la vez centros culturales y a la vez lugares de referencia turística–, son casi un organismo vivo, con sus virtudes y sus achaques, e igualmente tienen en su entorno otros entes que interactúan con ellos, desde la fauna y la flora a la sociedad, una sociedad que a veces tiene necesidades muy distintas en su relación con el monumento. Podemos empezar entonces a hablar del firme vínculo patrimonio+paisaje+paisanaje.

Conocer todas estas circunstancias permite dar un segundo paso con cierta seguridad puesto que para comunicar, para difundir el valor del patrimonio, debemos ser conscientes de sus cualidades, buenas o malas, así como del público objetivo al que hay que dirigirse y cómo nos debemos comunicar con él. En España, todavía hoy, tenemos un gran déficit en divulgación de la historia o de la cultura en general; el conocimiento sigue pareciendo a muchos profesionales más elevado cuanto más restringido es, por tal motivo no deja de resultar llamativo que los grandes divulgadores del pasado sean periodistas o escritores y no historiadores, que aún siguen encerrados mayoritariamente en sus foros universitarios. Para que el patrimonio cultural resulte rentable, la divulgación es la tarea más importante porque es la que nos permitirá transmitir con entusiasmo, convencer y llegar a amplios sectores de la población –como ya ocurre en otros países europeos–, creándose una demanda capaz de generar nuevos empleos y en consecuencia actividad económica: basta ver lo que supone para Estados Unidos la historia del *Viejo Oeste americano*, un período de escasas décadas de vigencia del que apenas queda nada más que sus paisajes, pero que está sólidamente explotado desde hace más de un siglo. A la vez hay que tener en cuenta que la sencillez no significa simpleza y que para una correcta divulgación es necesario un sólido conocimiento previo, de modo que un buen divulgador debe ser capaz de conectar tanto los ambientes más especializados como con los más básicos.

Finalmente, el patrimonio cultural, como recurso que es, debe ser explotable, porque en caso contrario deja de ser un recurso para convertirse en una carga y las inversiones ya no serían tales, sino simples gastos. ¿Significa esto que todo vale en la explotación del patrimonio cultural? Desde luego que no, puesto que nos hallamos ante elementos muy sensibles cuyo deterioro o destrucción pueden resultar irreparables, como continuamente se viene demostrando, de ahí que la planificación sea esencial y en esta planificación hay que tener en cuenta un factor fundamental, casi siempre olvidado, el papel de la población local que, en definitiva, ha sido quien ha salvaguardado el bien a lo largo de toda su trayectoria histórica. Es frecuente que cuando un elemento cultural adquiere un rango importante y empieza a ser conocido, reconocido y visitado, toda actuación que sobre él se lleva a cabo se hace desde instancias ajenas a la propia población del entorno. Es cierto que son las administraciones quienes acaban teniendo la competencia y la responsabilidad de su con-

servación, pero también es verdad que un bien patrimonial es lo que ha llegado a ser gracias a quienes lo han arropado tradicionalmente y no se pueden tomar determinaciones obviando ese hecho y sin contar con el vecindario, por este motivo muchas veces una población acaba viviendo mayoritariamente de espaldas a su monumento más emblemático, que queda sólo a disposición de los visitantes y del pequeño sector local que puede explotarlo de forma directa. Cuando el monumento no es tan relevante como para tener una explotación directa evidente, como ocurre en muchas pequeñas poblaciones, acaba por convertirse en algo totalmente ajeno, que incluso provoca molestias, de modo que el entorno se inhibe por completo, rompiendo la estrecha relación que tenía hasta entonces con él, recayendo toda la responsabilidad de su mantenimiento sólo y exclusivamente en las administraciones, para las que sí empieza a suponer ya una verdadera carga puesto que no están preparadas para acometer iniciativas de carácter más comercial. La explotación sostenible es por tanto un verdadero reto y en ella la participación de la población local y de los agentes sociales es un factor determinante y el umbral necesario para implicar con pleno compromiso a administraciones, mecenas, patrocinadores e inversores. Es en este punto donde se da el salto indispensable de pensar en clave de elemento, de monumento aislado, a territorio o espacio cultural y de la intervención tradicional bajo el prisma de restauración, rehabilitación, o como queramos denominarlo, según el vocablo más vanguardista, a conocimiento de una realidad cultural como bien social, con todo lo que esto puede implicar.

Traslación a la realidad de un modelo teórico. Las actuaciones de la Fundación Santa María la Real

Hablar de un modelo teórico trasladado a la realidad no es del todo acertado, puesto que no podemos pensar en una reflexión, en un debate previo testeado solo en laboratorio y aplicado después en el campo, una vez limadas las presumibles deficiencias. Quienes desde hace largos años estamos vinculados al proyecto de Aguilar de Campoo nos hemos equivocado muchas veces y es en los errores donde hemos aprendido; aunque siendo conscientes de que un error siempre conlleva pérdidas, la cautela ha sido una guía permanente. A lo largo de todos estos años se han puesto en marcha muchas iniciativas, algunas definitivamente abandonadas por su inviabilidad, otras fracasadas por nuestra propia torpeza, otras en permanente modificación o readaptación a las circunstancias, pero otras se han desarrollado con pleno éxito, sirviendo incluso como modelo para otros territorios. Como herederos del programa de Escuelas Taller creemos que el mejor laboratorio posible es el trabajo día a día, en contacto con la realidad, trabajando en proyectos reales, no virtuales o experimentales, porque es ahí donde el fracaso verdaderamente duele y donde, en consecuencia, se ha de poner el máximo cuidado.

El modelo teórico ha ido configurándose, por tanto, a la vez que su traslación a la realidad y a cada déficit observado se ha procurado dar una respuesta que al menos sea válida para el medio en que vivimos: ¿que hay que buscar un icono que sea capaz de captar la atención en una zona despoblada y deprimida?, ¡hagámoslo!, y así nació un gran proyecto sobre el arte románico; ¿que hay que demostrar con iniciativas concretas y sencillas la viabilidad del empleo en torno al patrimonio cultural?, ¡pongámoslo en marcha nosotros mismos!, y así nacieron varias pequeñas empresas vinculadas a la restauración,

a la artesanía y al turismo rural; ¿que nos hallamos en una territorio envejecido donde los jóvenes emigran por falta de trabajo?, ¡hagamos de la necesidad virtud y convirtamos la amenaza en oportunidad!, y así nació la Residencia de la Tercera Actividad.

En 1994 la asociación Centro de Estudios del Románico se convirtió en Fundación Santa María la Real, para mejorar su operatividad, aunque algunos de los grandes proyectos que se desarrollaron en años sucesivos o que aún están vigentes ya se habían puesto en marcha con anterioridad. Uno de ellos, ideado en 1992 bajo la convicción de que el conocimiento es el primer paso para poner en valor y rentabilizar un recurso, es la *Enciclopedia del Románico en España*, un ambicioso estudio, único en el mundo, que cuenta con la particularidad de que se está llevando a cabo por una pequeña entidad privada y, sobre todo, porque se elabora en gran medida con jóvenes licenciados, historiadores y arquitectos fundamentalmente, reclutados entre las filas de los desempleados con el apoyo del conocido hoy como SEPE y antes INEM. Y a la vista de los resultados cabe hacerse la pregunta de si una sociedad como la española puede permitirse el lujo de mantener inactivo, o en el mejor de los casos dedicado a otros menesteres más simples, un recurso intelectual de tal calibre.

PROGRAMAS Y ACTIVIDADES

Tanto los fines como las líneas de actuación para su consecución continúan la directriz trazada desde la constitución del Centro de Estudios del Románico, ampliando el marco legal y adaptando las perspectivas de actuación a los nuevos tiempos.

Como señal de identidad encontramos los programas culturales impulsados en la actualidad desde la Fundación Santa María la Real, que son:

– La ampliación de la *Enciclopedia del Románico* a todo el territorio ibérico. Constituye un auténtico proyecto cultural en el que la Fundación lleva inmersa más de tres décadas y en el que ya han participado más de un millar de investigadores. Un equipo que ha logrado dar forma a esta exhaustiva y rigurosa compilación de los testimonios medievales que se ubican o pertenecieron a este espacio geográfico. Una progresión basada en una planificada labor de difusión y comercialización. Este proyecto está caracterizado por su exhaustividad, su carácter metódico, el compromiso logrado entre lo científico y lo accesible, su riqueza gráfica y una cuidada edición. Aspectos que le han hecho merecedor del Diploma Europa Nostra a la mejor labor editorial en 2003 y que han llevado la colección a las principales librerías y bibliotecas internacionales.
– La creación del Museo Territorial del Románico y el Territorio, que ofrece al visitante una nueva forma de acercarse al patrimonio, una experiencia más orientada al disfrute sensorial, en la que de la mano de guías profesionales, descubrirán las mejores rutas de un entorno cargado de historia. Concebido como una ventana a través de la cual el visitante accederá a caminos, pueblos, iglesias, tradiciones, paisajes, gastronomía, gentes… el centro fundamenta todas sus actividades en la triple E: educación, entretenimiento y emoción.

– Garantizar la continuidad de diferentes cursos, talleres y seminarios especializados y el desarrollo de una importante labor editorial específica para fomentar el estudio y la investigación en el ámbito del patrimonio, que es uno de los fines de la Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico.



FIG. 3 Taller de caligrafía medieval. Fotografía de Carmen Molinos.

– También se trabaja activamente con las nuevas tecnologías, por ejemplo en la creación de un Centro de Documentación del Románico, de un Centro Tecnológico del Patrimonio, en numerosas colaboraciones con diferentes instituciones y organismos y especialmente en el desarrollo de programas de investigación y aplicaciones tecnológicas en conservación preventiva (Sistema de Monitorización del Patrimonio - MHS) que mediante la colocación de pequeños sensores inalámbricos en puntos concretos de los edificios históricos, permite mejorar la preservación del patrimonio cultural y, sobre todo, optimizar gastos.

Notorio interés vienen demostrando en los últimos años los proyectos desarrollados desde el Programa de Conservación del Patrimonio a través de un nuevo modelo de gestión: los planes territoriales, en el que los monumentos no se conciben como algo aislado, sino como parte integrante de un entorno, vinculado a sus gentes. Podemos señalar la puesta en marcha de diversos planes directores y programas de intervención territorial, entre los que destacan:

– el Plan de Intervención en Iglesias Románicas y Entornos de la Antigua Merindad de Campoo en Cantabria.



FIG. 4 Iglesia de Villanueva de la Torre, Palencia. Fotografía de César del Valle.

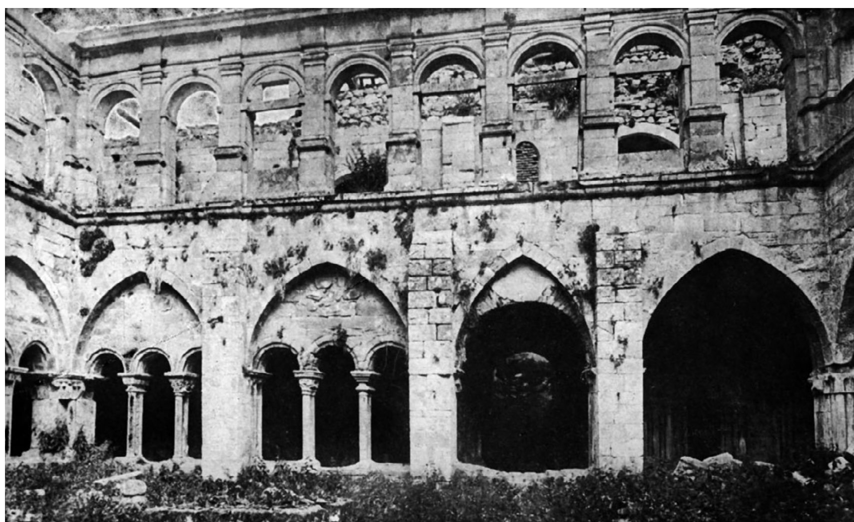


FIG. 5 Claustro del Monasterio de Santa María la Real la Real antes de su restauración. Foto de archivo.



FIG. 6 Claustro del Monasterio de Santa María la Real. Fotografía de César del Valle.

– el más ambicioso Plan de Intervención Románico Norte impulsado por la Junta de Castilla y León en colaboración con las Diócesis de Palencia y Burgos. Surgió en 2005 con el objetivo de facilitar la restauración integral de más de medio centenar de iglesias románicas y sus entornos en las provincias de Palencia y Burgos. Con el paso de los años, el plan se ha ido adaptando a las necesidades del territorio, afianzando la imagen de marca «Románico Norte» y ampliando su radio de acción. Junto a las actuaciones de restauración y conservación, la principal apuesta de los últimos años ha sido incentivar el potencial turístico de los templos restaurados, mediante la organización de actividades culturales.
– el Plan de Intervención en el Románico de Guadalajara.
– el Plan de Intervención «Románico Atlántico». Es un proyecto de cooperación transfronteriza para el patrimonio cultural. Promovido por la Junta de Castilla y León, la Fundación Iberdrola y la Secretaria de Estado de Portugal. Desde su puesta en

marcha, el plan actúa en una veintena de edificaciones románicas en las provincias españolas de Zamora y Salamanca y en las regiones portuguesas de Oporto, Vila-Real y Bragança. El objetivo principal del proyecto es restaurar y conservar el patrimonio de estos territorios para convertirlo en una fuente de riqueza y empleo. Así, las acciones de restauración y conservación se completan con la organización de conciertos, jornadas de puertas abiertas y talleres formativos dirigidos a las personas que a diario se ocupan de mostrar y atender los templos.

Por otro lado, es creciente la participación de la Fundación en proyectos de divulgación y difusión del patrimonio, lo que ha cristalizado en la creación de una productora audiovisual y en la puesta en marcha y dinamización de una variada gama de portales web, entre los que destaca canalpatrimonio (http://www.canalpatrimonio.com), la primera televisión por internet dedicada por completo a la difusión del patrimonio; se ha distinguido por su carácter innovador, didáctico e interactivo, que se nutre de las múltiples ventajas de las nuevas tecnologías para crear un gran espacio virtual con vídeos, noticias y actividades vinculados al patrimonio y la cultura.

No podemos obviar el proceso de internacionalización de los proyectos en los que participa la Fundación, más allá de los programas europeos en los que colabora. Principalmente se trata de dos líneas de trabajo. Por un lado la prospección de las condiciones para la implantación del sistema de Escuelas Taller en África, que ha tomado forma con el desarrollo del programa en Senegal. Por otro lado, la línea estratégica de participación en proyectos latinoamericanos, que ha cristalizado con la creación de la entidad «Santa María la Real-Chile», con el ánimo de implantar en este país el modelo de intervención que caracteriza a nuestra Fundación.

Por último, la Fundación promueve a día de hoy diferentes empresas relacionadas con el cumplimiento de los fines de la entidad:

– Ornamentos Arquitectónicos S.L., que contribuye a la difusión del patrimonio cultural con piezas únicas, maquetas a escala de los principales monumentos europeos, elaboradas de forma artesanal. Además, el taller ha diversificado su oferta en los últimos años, incorporando juegos tradicionales, pequeños detalles o incluso creando modelos a gran escala que constituyen por sí mismos auténticos centros de interpretación.
– Patrimonio y Restauración S.L.
– Posadas de Santa María la Real, que engloba la Posada de Santa María la Real y el Molino de Salinas. Dos establecimientos diferentes, pensados para dar un servicio turístico de calidad a un público cada vez más diverso y exigente.
  La Posada ofrece al visitante un rincón para el descanso y el disfrute, desde el que poder adentrarse en el País Románico. Su jardín, sus cuidados espacios y la oferta gastronómica de su restaurante constituyen el principal potencial de un enclave que cuenta con el distintivo de Posada Real.
  A pocos kilómetros, en Salinas de Pisuerga, el Molino se presenta como el espacio ideal para disfrutar de la comarca en un entorno relajado y con múltiples posibilidades.

La unión de ambos enclaves da como resultado una oferta personalizada, adaptada a cada huésped, que de la mano de Cultur Viajes apuesta por convertirse en referencia del turismo de calidad vinculado al patrimonio.

– Residencia «Tercera Actividad», que apuesta constantemente por ser un centro abierto e implicado con la sociedad de Aguilar de Campoo y comarca. Cumple sus objetivos gracias a la realización de diferentes actividades, jornadas intergeneracionales.... Está apostando por realizar una importante renovación en sus instalaciones. Potencia el servicio de permanencia de los mayores en sus domicilios. Desarrolla el trabajo en las aulas de formación sin descuidar a su vez la formación continua del personal del centro mediante la programación de cursos a demanda, que facilitan la mejora en áreas relacionadas directamente con su trabajo.

MODELO DE INTERVENCIÓN

Durante estos más de treinta años de trayectoria, la Fundación Santa María la Real ha ido depurando este modelo de intervención en el patrimonio más allá de la restauración física, cuyos puntos clave son los siguientes:

– **Integración de las intervenciones** en un sistema completo, planificado y donde prima la agilidad en la gestión y la implicación de todas las entidades participantes.

– **Máxima participación social e institucional**. En este apartado podemos señalar tres grupos sociales cuya implicación en los proyectos es fundamental:
  – Vecinos.
  – Instituciones.
  – Tejido empresarial y profesionales.

– **Desarrollo de un amplio plan de comunicación** antes, durante y después de la intervención. Es necesario realizar una planificación de las acciones de comunicación que se van a llevar a cabo a lo largo del tiempo de duración del plan, así como determinar los mensajes a transmitir y los públicos a los que han de dirigirse.

– **Sensibilización y educación**. Estas acciones se desarrollan con dos grupos sociales muy definidos:
  – Niños en edad escolar. Ya que si se consigue que los alumnos interioricen y valoricen su patrimonio, podrán convertirse en ciudadanos activos en su preservación. Para ello, se diseñan materiales y actividades educativas adaptadas a cada ciclo escolar, poniendo especial énfasis en su perspectiva lúdica, y se ponen en marcha con aquellos colegios interesados.
  – Guías y párrocos de las iglesias. Como encargados en muchos casos de explicar la historia, evolución e importancia de los edificios a los visitantes, es fundamental que los datos de que dispongan sean correctos y estén actualizados, lo que se consigue organizando talleres informativos impartidos por los especialistas de la Fundación Santa María la Real.

– **Puesta en valor y gestión de iniciativas turísticas y culturales**. La puesta en valor del patrimonio viene de la mano de la utilidad. El edificio restaurado debe tener unos usos que sean apreciados por la sociedad que los custodia. Un elemento clave es la accesibilidad a los monumentos, ya que uno de los grandes problemas que sufre buena parte del patrimonio es su dispersión en el medio rural con una población envejecida y desestructuralizada. Para paliar este problema, se están poniendo en marcha sistemas de apertura remota, así como la utilización de las nuevas tecnologías (descargas por bluetooth, GPS, tecnología 3G, wifi, realidad aumentada) para facilitar el acceso a la información.

– **I+D+i aplicado al patrimonio**.

La aplicación de soluciones e iniciativas centradas en la tecnología, la investigación y la innovación son prioritarias en los distintos programas de intervención territorial de la Fundación Santa María la Real. Habitualmente, estas se establecen en cuatro niveles a través del Sistema de Monitorización del Patrimonio (MHS):

1- CONSERVACIÓN PREVENTIVA. Este apartado va referido a las acciones ligadas al control ambiental, estructural, biológico, químico, etc., del patrimonio y a su mantenimiento rutinario, ordinario y continuado. El objetivo es alcanzar un nivel óptimo de conservación preventiva –es decir, sin esperar a la aparición de disfunciones– mediante acciones programadas y monitorización que permitan la racionalización de la inversión al evitar o dilatar en el tiempo las intervenciones de restauración, más costosas y traumáticas para el bien cultural.



FIG. 7 Monitorización de la muralla de Ávila. Fotografía de Marce Alonso.

2- SEGURIDAD. Aplicación de sistemas de seguridad y protección frente al expolio o la degradación, incendios e inundaciones, especialmente en monumentos o yacimientos más apartados y vulnerables: vigilancia remota, control de presencia, detectores de humo o identificación individualizada de bienes muebles mediante registros electrónicos para su detección en caso de expolio.

3- EFICIENCIA ENERGÉTICA. La instalación de dispositivos de control para un uso racional de los recursos, especialmente los energéticos, así como la implementación de medidas de ahorro o el uso de fuentes alternativas, son decisivos para garantizar la sostenibilidad económica y un compromiso ambiental y social para el disfrute del patrimonio.

4- GESTIÓN DE USO. Incluye aspectos como la difusión (aplicaciones para dispositivos móviles, integración con tecnologías audiovisuales, iluminación inteligente, etc.) y la gestión de las visitas (control telemático de accesos, pasarelas de pago, gestión de ingresos, etc.).

HACIA DÓNDE VAMOS

Hablar del futuro en cierto modo es hablar del presente puesto que, como ya se ha explicado, el hábito de esta Fundación es experimentar sobre la realidad diaria, con proyectos concretos que estén en marcha, de modo que los nuevos retos ya están aquí. Es cierto sin embargo que el compromiso hacia el patrimonio cultural, y no solo nuestro sino de toda la sociedad, es la innovación y muy especialmente en los sistemas de gestión, como la mejor manera de buscar unos resultados eficientes, sostenibles y capaces de generar riqueza. Una gestión responsable del patrimonio, a partir de las pautas que hemos desarrollado en estas páginas, puede convertirlo en un recurso cada vez mayor, pero para ello debemos ser capaces de analizar todos los procesos –que van más allá del simple estudio, de la restauración o del disfrute turístico– y pensar en términos de cadena de valor, el concepto acuñado por Michael Porter para calibrar la competitividad de una empresa a través de sus distintas actividades, es decir, cómo enriquecer y optimizar la aportación y los resultados de cada uno de los eslabones para crear una cadena sólida.

Para que este reto sea efectivo hay que buscar el compromiso de muchos sectores: los propietarios de los bienes, los usuarios –en su más extenso abanico–, la población local, las administraciones públicas –para quienes la salvaguarda del patrimonio es una obligación, pero que sin duda son las mayores beneficiarias de una gestión más eficiente–, los empresarios vinculados directamente al mantenimiento o disfrute de los recursos culturales, los centros de investigación y universidades, los aficionados –que desarrollan un importante papel de promoción y control a través de sus organizaciones o de las redes sociales–, o incluso de las grandes corporaciones empresariales, que a través de sus iniciativas de RSC pueden apoyar numerosos proyectos. En todo ello ya se encuentra trabajando la Fundación Santa María la Real, pero el resultado será inútil si el modelo no se replica e incluso se mejora.

Volver al índice

8
Proyecto y construcción de puentes de fábrica

JAVIER LEÓN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de la ETSICCP. UPM

INTRODUCCIÓN

Es evidente que en un texto como este no cabe sino enunciar algunos de los muchos y fascinantes aspectos del proyecto y la construcción de los puentes de piedra o ladrillo. Hay muchos textos en algunas bibliotecas que puede consultar la persona interesada, pero deberá empezar por los fondos que atesora la Biblioteca de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid [FIG. 1]. Precisamente a presentar dichos documentos y a difundirlos se orientó la exposición que tuvo lugar en la Escuela entre abril y julio de 2016 y que, como se explica en otro lugar de esta misma monografía, fue precisamente la chispa que desencadenó el curso de verano organizado por la Fundación Juanelo Turriano y al que se refieren los textos de esta publicación. Dichos fondos bibliográficos están disponibles también en la plataforma de la Universidad Politécnica de Madrid (http://www.upm.es/).

El interés que tiene saber cómo se proyectaban y construían estos puentes trasciende lo meramente descriptivo-divulgativo, atractivo ya de por sí, y se proyecta hacia la faceta conservadora de los ingenieros, que hoy tenemos que asegurar que estos puentes sigan prestando su función y sacar de ellos todo el partido posible a partir de la identificación de sus puntos fuertes y, sobre todo, de sus potenciales debilidades. Eso solo puede basarse en el conocimiento de cómo se proyectaron y construyeron. Además, aprenderlo sirve para reconocer el enorme mérito de los ingenieros que nos precedieron, desde el despacho, la obra o la cátedra, proyectando y construyendo estos puentes y enseñando su experiencia a los nuevos ingenieros… hasta que se perdió el hilo cuando estas estructuras cayeron en el olvido.

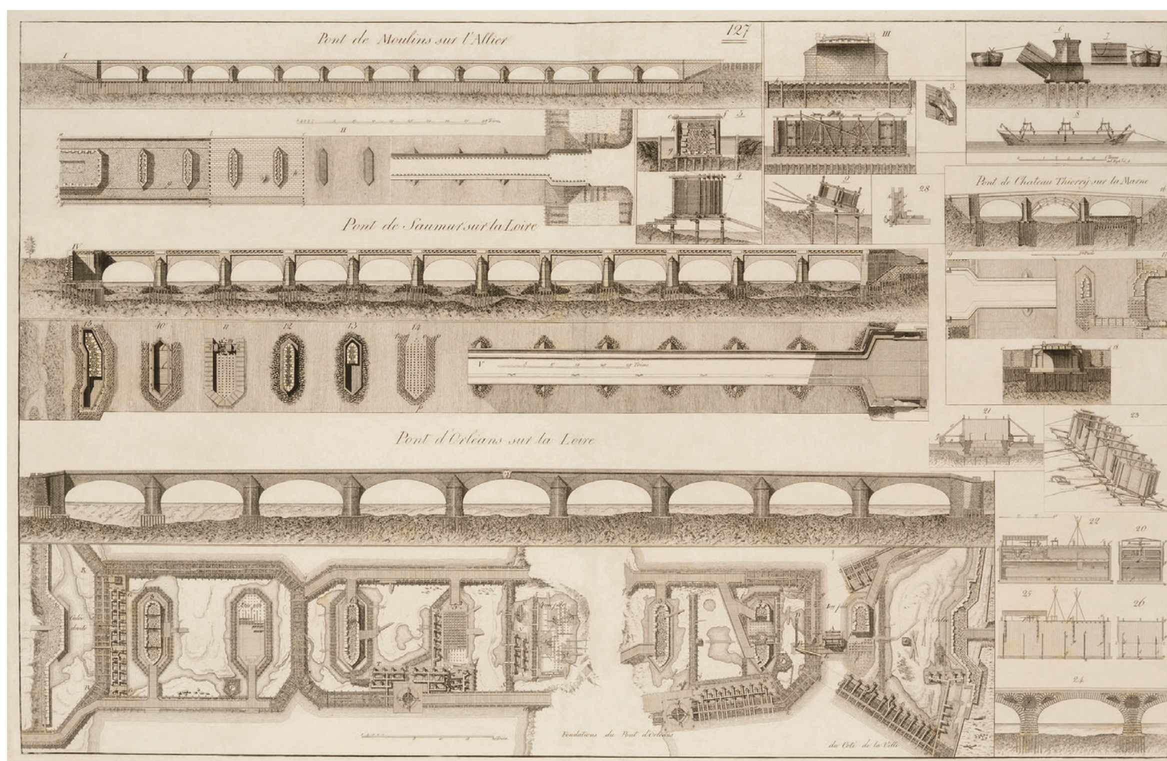


FIG. 1 Lámina 127 del tratado de WIEBEKING, dedicada a la descripción de las sucesivas fases de la construcción del puente de Orleans, de Perronet, 1760. Biblioteca de la ETSICCP-UPM.

CONFIGURACIÓN DE LOS PUENTES DE PIEDRA

Manuel Durán, en su artículo «Componentes de los puentes de piedra. Morfología e historia» de esta misma monografía, plantea una excelente descripción, como es habitual en él, de la configuración de los puentes de fábrica. También el apartado 4.5 de la referencia Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 2014, presenta con algún detalle una sinopsis de los aspectos formales de estos puentes que permite al observador situar en el tiempo, siquiera de manera aproximada, el puente que tiene ante sí.

Lo primero que se encuentra el viajero que circula por la vía a la que da soporte el puente es, obviamente, la plataforma, horizontal o alomada, cuya textura es la que dan pavimento y aceras, si las hay, o, de manera más difuminada, la banqueta de balasto, sin solución de continuidad con relación al resto de la vía, expresión de cómo estos puentes son una prolongación natural y discreta del propio terreno, sin juntas, cualidad apreciadísima por los ingenieros de mantenimiento, y que encuentra en estos puentes el paradigma del éxito funcional y de durabilidad.

Bajo la plataforma se ubica el relleno [FIG. 2], cuya misión no ha sido siempre comprendida ni estudiada. El relleno rígido es el más profundo y se encuentra sobre las sillas de las bóvedas en las pilas y en los estribos, con altura, desde la línea de arranques, equivalente a 2/3 o 4/5 de la flecha, según se trate de puentes de carretera o ferroviarios, con las lógicas variaciones. El relleno rígido es un elemento resistente de enorme importancia porque tiene capacidad portante y contribuye a la transmisión de las cargas desde la pla-

taforma hasta el trasdós de la bóveda trabajando como elemento constitutivo del esquema resistente longitudinal.

El relleno granular, más económico, tiene la misión de repartir la acción de las cargas sobre la plataforma hacia el conjunto relleno rígido –bóveda. Tiene el inconveniente de que genera empujes sobre los tímpanos, que son los muros laterales que cierran el espacio entre laterales de bóvedas. Los tímpanos son también el soporte del pretil, que se convierte en elemento de estabilidad, no solo de contención, del muro-tímpano.

En ocasiones, el relleno se ve sustituido por lengüetas o por bóvedas interiores, cegadas por tímpanos, o abiertas para mejorar la capacidad de desagüe, como sucede en Mérida, Toro o Besalú.



FIG. 2 Configuración del puente de Urnieta (Guipúzcoa) tras su autopsia (LEÓN y ESPEJO, 2007). Puede observarse la existencia típica de un relleno rígido sobre las bóvedas, cuya cota oscila entre 2/3 y 4/5 de la flecha de las bóvedas (puentes de carretera y de ferrocarril, respectivamente).

Pero es la bóveda el elemento que más destaca, el que resulta más difícil de construir y el que determina la fisonomía del puente más que ningún otro componente del mismo. Las hay de diferente luz, geometría, espesor, aparejo y material, único o híbrido de piedra, ladrillo u hormigón en masa. Es, indudablemente, el elemento estructural protagonista del hecho resistente, con un halo de magia que desde siempre cautivó a los técnicos y a todos los espectadores con un mínimo de sensibilidad.

Cuando la longitud del puente lo exigía, y tras un análisis que se expone más adelante, se construían pilas, cuya altura estaba condicionada por la rasante y cuyo espesor, en el plano del alzado, es muy variable de unas épocas a otras por razones constructivas, de capacidad de desagüe del cauce sobre el que cruza el puente y hasta de estrategia bélica. Para mejorar las condiciones hidrodinámicas, las pilas se rematan en tajamares, piezas de evocaciones poéticas, que se coronan con sombreretes a la altura del arranque de los tímpanos, o llegan hasta la plataforma, en la que se habilitan los balconcillos, como los del puente de Toledo sobre el Manzanares, en Madrid, que servían para facilitar el cruce de vehículos y personas o para acoger a espectadores del río, de su entorno y, en menor medida, del propio puente.

Siguen los estribos, *culées* en francés, verdaderas posaderas del puente al comienzo y al final del mismo, que le sirven de apoyo sobre las riberas, por una parte, y articulan la transición con el terreno natural o artificial de los terraplenes, por otra, en cuyo caso se disponen muros laterales de contención, en prolongación o en vuelta. Se trata de piezas discretas que suelen pasar inadvertidas.



FIG. 3 Puente de Besalú (Girona).

En ocasiones, sobre pilas o estribos, se alzan torres [FIG. 3] que sirvieron en su día como elementos defensivos o como puestos en los que abonar los derechos de pontazgo, destinados a sufragar los gastos de mantenimiento o a amortizar la inversión, o a las dos cosas. También pueden ser arcos triunfales o votivos, como sucede en Alcántara y, de manera más difuminada, menos explícita, en puentes más modernos como el de Brooklyn –de pilas de piedra–, como recuerda Miguel Aguiló (Aguiló, 2013).

Por último, pero no menos importantes, están las cimentaciones, casi siempre ignoradas, supuestas competentes y habitualmente invisibles (razón por la cual se sufre menos, como sucede con las cosas que se ignoran). Como se indica en Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 2008, se trata de elementos sensibles cuando no se apoyan en roca, porque los conocimientos sobre mecánica de suelos, los elementos y los métodos constructivos eran muy limitados en la época en que estos puentes fueron proyectados y construidos.

En las páginas siguientes se recorren los procesos de definición y construcción de algunos de los componentes citados. Se insiste en animar al lector a acudir a las fuentes originales porque aquí ni se puede ni se debe ser exhaustivo.

LOS PASOS PREVIOS: ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO, MEDIDA DE CAUDALES...

Casi todos los tratados clásicos de construcción de puentes de piedra o ladrillo (Morandière, 1874; Gaztelu, 1910 y 1919), comienzan por este asunto, plenamente vigente hoy, pero tal vez con más grados de libertad para los ingenieros de entonces que para los de ahora, debido a las menores rigideces que imponía el trazado o, dicho de otra forma, a

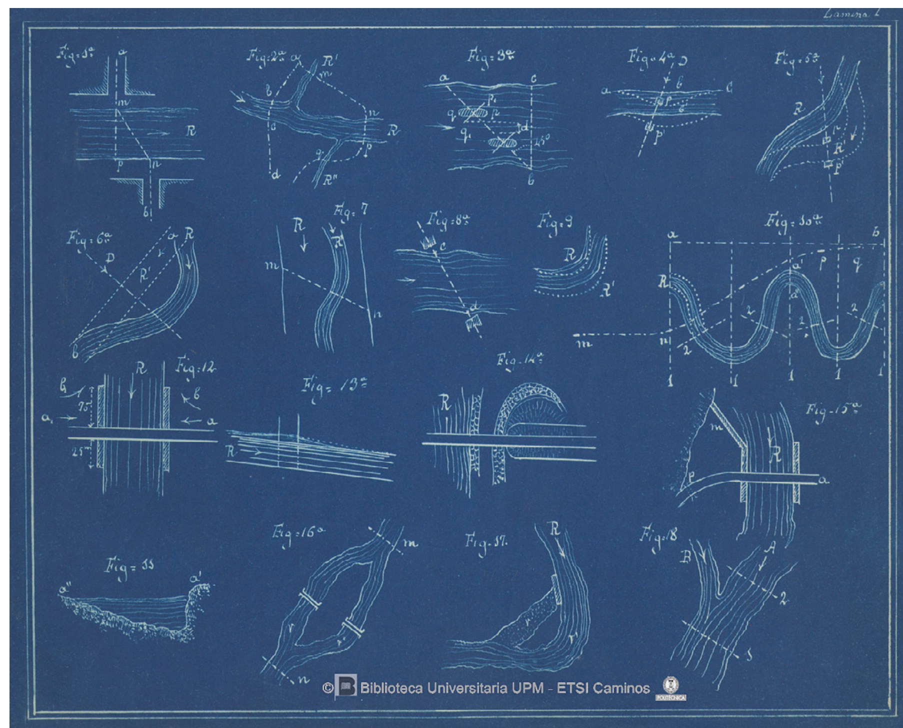


FIG. 4 Esquemas auxiliares para apoyar las explicaciones de los alumnos de Luis Gaztelu (GAZTELU, 1910) y relativos a la ubicación del puente con respecto al cauce. Lámina 1 del original en ferroprusiato. Biblioteca de la ETS-ICCP-UPM.

que este era más dócil al mejor encaje de los puentes en su cruce sobre los cauces. Naturalmente, los puentes ferroviarios admiten, en este sentido, importantes matices.

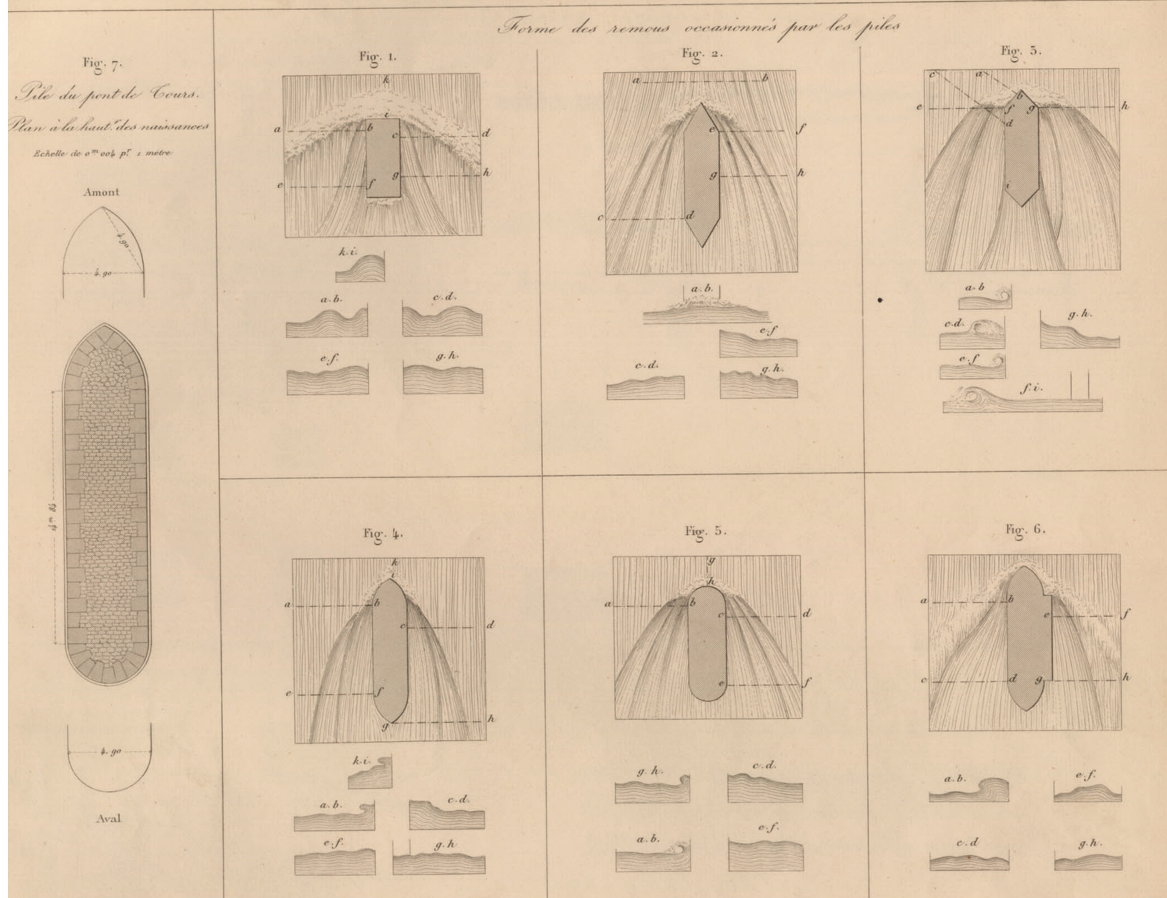
La figura 4 ilustra estas ideas, muy ricas en consideraciones variadas, que denotan la gran experiencia de su autor, quien, a su vez, lo encontró en otros textos que ponía a su disposición, como ahora, la Biblioteca de la Escuela. Entre dichas consideraciones están las relativas al cruce del río y a su dinámica. Así, el espectador que observe que el puente cruza el cauce de manera oblicua está invitado (requerido si es ingeniero) a pensar por qué, siendo la longitud del puente mayor y el aparejo de las bóvedas más complejo –las pilas han de ser paralelas al cauce, para minimizar socavaciones y no mermar la capacidad de desagüe–, es decir, más caro que si fuera ortogonal. Las razones hay que buscarlas en imposiciones ineludibles del trazado o en mejores condiciones de cimentación. A veces, es el río el que ha cambiado de trayectoria (Talavera de la Reina o Toro) porque los meandros se han rectificado de manera natural o forzada. Sirva esta reflexión para subrayar de nuevo el gran conocimiento de hidrodinámica fluvial que tenían estos ingenieros, especialmente a partir de Wiebeking.

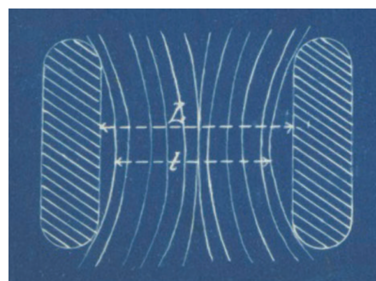
Carl Friedrich von Wiebeking era eminentemente un ingeniero hidráulico (además de constructor de puentes y arquitecto autor de muchos edificios públicos), que dejó descritos dispositivos y mecanismos (entre ellos el de un tal Ximenes, para medir la dirección de la corriente) para la medida de caudales, velocidades, pendientes, batimetría, etc. [FIGS. 5a y b]. El desarrollo de la Hidrología y el análisis de los datos de las estaciones de aforo, junto con la cada vez mayor precisión de la Cartografía, permitieron contar con el apoyo de trabajos como el que presenta Morandière (Morandière, 1874) para el estudio de la cuenca del río Loira [FIG. 6], con diagramas que muestran los caudales correspondientes a crecidas concretas a partir de lo medido en estaciones de aforo.

FIGS. 5a y b Láminas XVIII (028) y XIX (029) de WIEBEKING, 1811-1814, que muestran diferentes dispositivos para la medida de caudales y batimetría del río. Biblioteca de la ETSICCP-UPM.



FIG. 6 Análisis de caudales en la cuenca del Loira (MORANDIÈRE, 1874) para evaluar la capacidad de desagüe de las estructuras. Biblioteca de la ETSICCP-UPM.





FIGS. 7a y b Arriba, Lámina 5 de MORANDIÈRE, 1874, que recoge la interacción entre corriente y pilas, según la forma de los tajamares. El trabajo original, citado por el propio Morandière, es de GAUTHEY, 1843.
A la derecha puede verse la definición de la contracción de la vena líquida según GAZTELU, 1910.

Ejemplo también de la capacidad de observación y estudio que, sin duda, tenían ya los ingenieros romanos, aunque no haya llegado hasta nosotros referencia escrita, que yo sepa, es la figura 7a, que también recoge J. E. Ribera (Ribera, 1929), muy útil para entender el efecto que tiene la forma del tajamar en cara de aguas arriba, condicionante del comportamiento para mejorar la capacidad de desagüe y de alejar los riesgos de socavación. En la figura 7b se muestra el esquema que apunta Gaztelu (Gaztelu, 1910) para explicar cómo mejora la capacidad de desagüe de una forma a otra de los tajamares. Para el coeficiente de contracción $m = l/L$ Gaztelu recomienda 0,8; Ribera (Ribera, 1929) sugiere rebajar el valor de m a 0,7 en el caso de puentes con bóvedas rebajadas a un valor cercano a la unidad, con valor más alto cuanto mayor es la luz L). La forma del tajamar en el paramento de aguas abajo es irrelevante a los efectos de la socavación, a no ser que sea de temer una socavación regresiva.

CONFIGURACIÓN DEL ALZADO Y DE LA PLANTA

Luces y altura

La distribución de las luces, la magnitud de las mismas y la altura de la rasante constituyen el siguiente problema. En el caso de paso sobre ríos, es evidente que las luces más importantes eran (el tiempo verbal hace referencia también a que, a lo largo de los siglos, el cauce puede haberse trasladado) las situadas sobre el cauce principal, dada la complejidad de la ejecución de las cimentaciones. La altura de la rasante habrá de ser también tal que se asegure la capacidad de desagüe en caso de avenida.

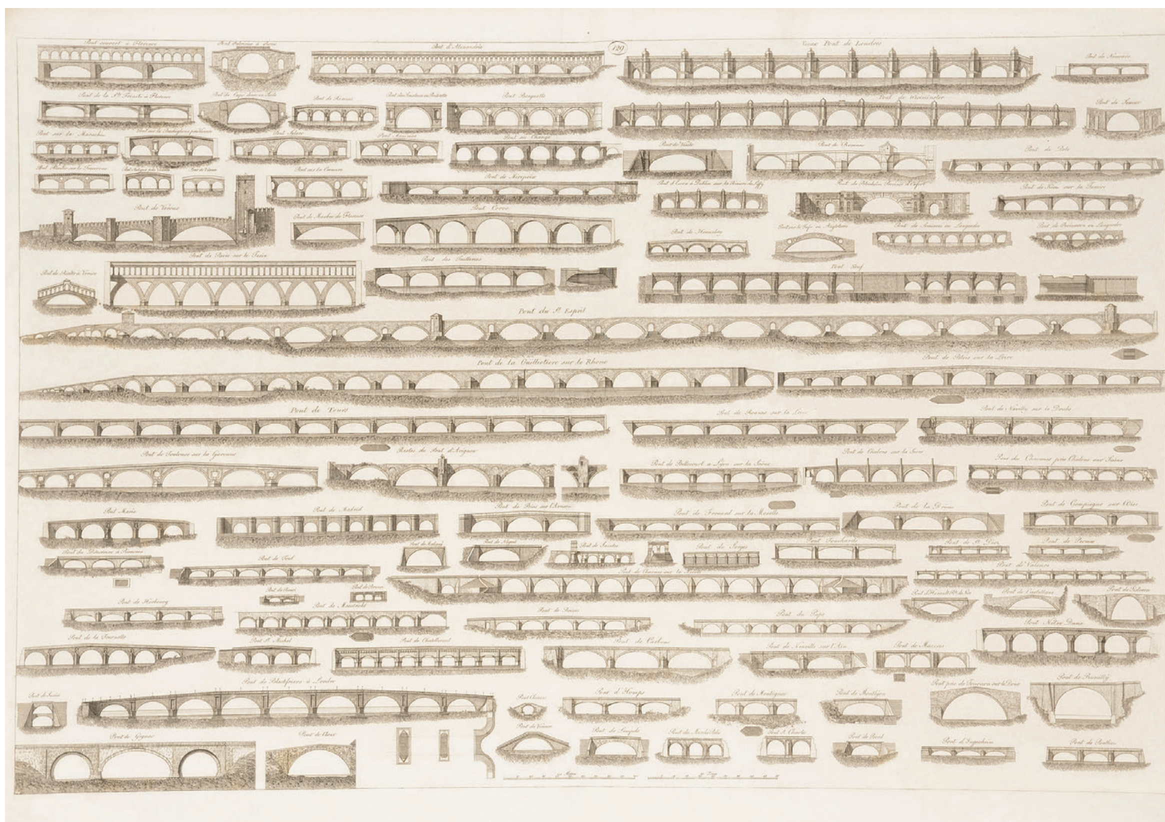
Gaztelu (Gaztelu, 1910) planteaba el problema general, a igualdad de longitud, de elegir entre más vanos cortos o pocos y de mayor luz. Advirtiendo, de entrada, que lo mejor para el régimen del río y para el ahorro de cimentaciones era acudir a un número razonablemente reducido de apoyos, planteaba la comparación en términos económicos. Así, llamando p_v al precio de obra de fábrica en volumen por m^3, y p_s al precio de paramento visto por m^2, proponía la comparación de costes entre las soluciones de luces cortas ($C_1 = p_v V_1 + p_s S_1$) y de luces mayores ($C_2 = p_v V_2 + p_s S_2$), sin tener en cuenta explícitamente el coste de las cimentaciones, decantándose por la de mayores luces y menos vanos si la diferencia $C_1 - C_2$ era pequeña aunque positiva. Además de las razones señaladas, en puentes urbanos, cuando el carácter monumental era importante, la elección se orientaba hacia las luces moderadamente grandes. En ese sentido, por luz moderadamente grande se entendía un valor en el entorno de los 20-25 m (piénsese que Alcántara, récord romano en Hispania, llegaba a 28,80 m). Luces de 40 m se consideraban técnicamente viables pero muy onerosas. Cabe recordar que al final del periodo dorado de los grandes puentes de piedra, Séjourné llegó a los 84,65 m de luz en el famoso puente Adolfo, en Luxemburgo (1903). Cabe añadir que, en 1910, para p_v y p_s se tomaban los valores 30 y 5 pesetas, respectivamente, equivalente, con alguna aproximación, a unos 50 y 10 € de hoy día.

Con relación a la altura de la rasante, en el caso de paso sobre cauces, se consideraba que el intradós de la clave no debería quedar por encima de 1 a 3 m sobre la cota de máxima avenida. En los ríos de poco caudal, cosa frecuente en los ríos españoles, se solía admitir 1 m. En los ríos grandes o de régimen torrencial que pueden arrastrar troncos importantes, el mínimo se establecía en unos 3 m.

A partir de comienzos del siglo XIX, cuando se divulgan los primeros grandes tratados de la construcción de puentes, los proyectistas utilizan las ratios que se desprenden del estudio de los puentes ya construidos. Wiebeking (Wiebeking, 1811-1814) fue de los primeros en presentar estos resultados en láminas y tablas como las de la figura 8, referencias que se utilizarán en los tratados posteriores hasta ya entrado el siglo XX.

Ancho de plataforma

En cuanto a la anchura de los puentes de piedra o ladrillo cabe decir que es muy variable. Así, mientras los grandes puentes urbanos pueden exhibir anchuras de 20 a 40 m, los puentes de caminos vecinales apenas superan los 3 m. Los puentes romanos (Durán, 2005) son mucho más anchos que los posteriores medievales porque el esquema imperial de calzadas concebía estas como vías de «gran capacidad» para el paso de vehículos, tro-



ad Pagina 484.

Tableau représentant les ponts en pierre les plus remarquables en Europe et les proportions de leurs principales parties: appartenant à l'architecture hydraulique 3 tome par Wiebeking 1814.

Tabelle von den merkwürdigsten steinernen Brücken in Europa und den Verhältnissen ihrer wesentlichsten Theile. Zu Wiebekings theoretisch-practischen Wasserbaukunst, dritter Band 1814.

+ Cette marque indique, que les dimensions sont inconnues à l'auteur.

+ Wo dieses Zeichen steht, sind dem Verfasser die Daten unbekannt.

FIG. 8 Lámina 129 de WIEBEKING, 1811-1814, con alzados de puentes diversos y tabla tomada del mismo texto.

pas y ganados, mientras que los constructores medievales, «minimalistas» por las circunstancias, daban a los puentes un ancho apenas estricto para el paso de carros, de anchura no mayor de 2 m aproximadamente. Naturalmente, ninguno de los tratados consultados concebía anchuras equiparables a las necesidades de los puentes carreteros de la actualidad. En cuanto a los puentes ferroviarios, la anchura se estipulaba en 4,60 para los de vía única y 8 m para los de vía doble (Gaztelu, 1910).

Rebajamiento y forma del intradós de las bóvedas

El siguiente problema que hizo correr ríos de tinta en textos, fórmulas y figuras, especialmente en los siglos XVIII y XIX, era la forma del intradós de las bóvedas.

Todos coinciden en las ventajas constructivas del medio punto y, en general, de las bóvedas cuya directriz es un segmento de circunferencia (bóvedas escarzanas). Los pragmáticos romanos resolvieron, al menos en Hispania, el 90 % de los casos con bóvedas de medio punto, siendo escarzanas en el 10 % de los puentes restantes (Villa del Río, Pedriña y Alconétar, este último con $L/f = 4{,}5$) (Durán, 2005), siendo L la luz libre y f la flecha o distancia entre la línea que une los arranques y el intradós de la bóveda en clave.

Morandière (Morandière, 1874) empieza recordando que la bóveda de medio punto es la que se utilizó en los puentes clásicos y la más agradable desde el punto de vista estético (hay que ver lo que hace la costumbre), pero viene a reconocer que el rebajamiento mejora la capacidad de desagüe y evita el problema de que los tímpanos generen, por sobreancho respecto a la pila, remolinos que propicien la socavación y la ruina, citando un par de ejemplos. También alaba la decisión de que los arranques de las bóvedas rebajadas se sitúen por encima de los niveles de máxima avenida, aunque recordando también que las bóvedas rebajadas generan asimismo mayores empujes que las peraltadas a igualdad de luz. En este sentido, debe tenerse en cuenta el menor peso total de las rebajadas con relación a las peraltadas, como señala Ramos (Ramos, 2015), siendo preferible hablar, cuando se compara, de la relación entre empujes horizontales y verticales.

También advierte Morandière (Morandière, 1874) del problema estético que se plantea, a su juicio (y al de muchos de sus coetáneos), en el arranque poco elegante de las bóvedas excesivamente rebajadas con relación a la pila, situando la relación óptima de L/f en torno a 7. Paradójicamente, deja constancia de que en los puentes urbanos la relación $L/f = 10$ es frecuente en Francia, poniendo como ejemplo el magnífico puente de la Concordia (antes Luis XVI) sobre el Sena en París [FIG. 9], plenamente operativo hoy. Sorprendentemente, al menos en mi opinión, no se tiene en cuenta que el rebajamiento

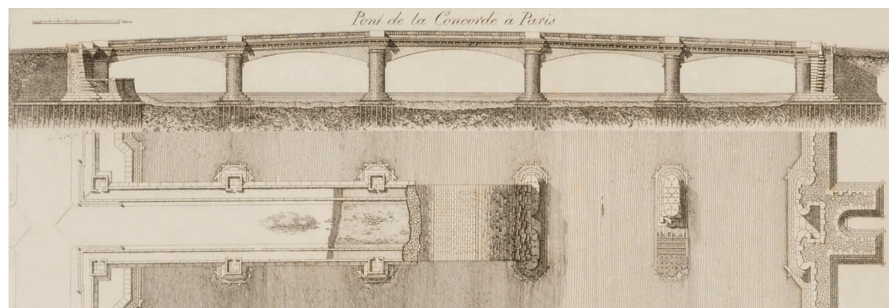
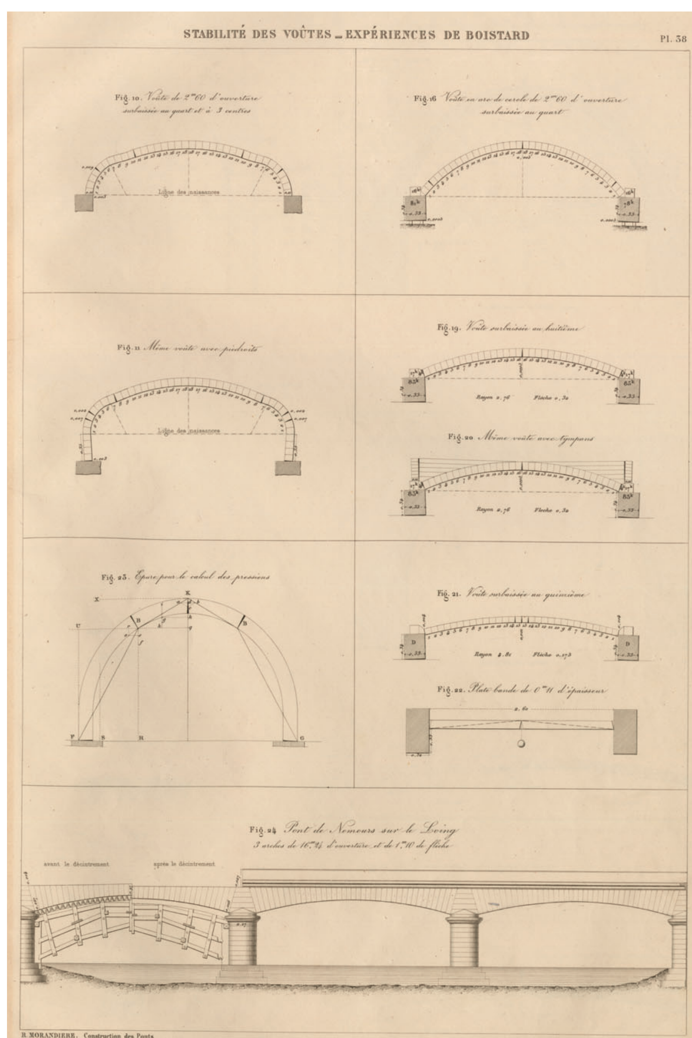


FIG. 9 Lámina 124 de WIEBEKING, 1811-1814, con el alzado y planta del puente de la Concordia, de Perronet, construido entre 1786 y 1791.

guarda estrecha relación con la esbeltez de la pila, en términos de espesor de la misma con relación a la luz *L*. Cuando, como en el puente de la Concordia, la esbeltez es grande, el efecto global del rebajamiento se ve realzado, si se compara con la mayor tosquedad del puente romano de Alconétar.

En todo caso, las opiniones relativas al rebajamiento fueron dispares. El propio Morandière (Morandière, 1874) da cuenta del rebajamiento *L/f* = 15 del puente de Nemours (de Boistard sobre planos de Perronet), que exigió de unas precauciones especiales durante la construcción. Se llegó a ensayar, para el puente del Louvre (no existe hoy con esa configuración), una bóveda con *L/f* = 18, dando lugar a «resultados totalmente fiables». En la figura 10a se muestran los ensayos del propio Boistard y en la 10b, una vista actual del puente de Nemours, con bóvedas rotundas, sin tímpanos, a sección completa y un aspecto soberbio.

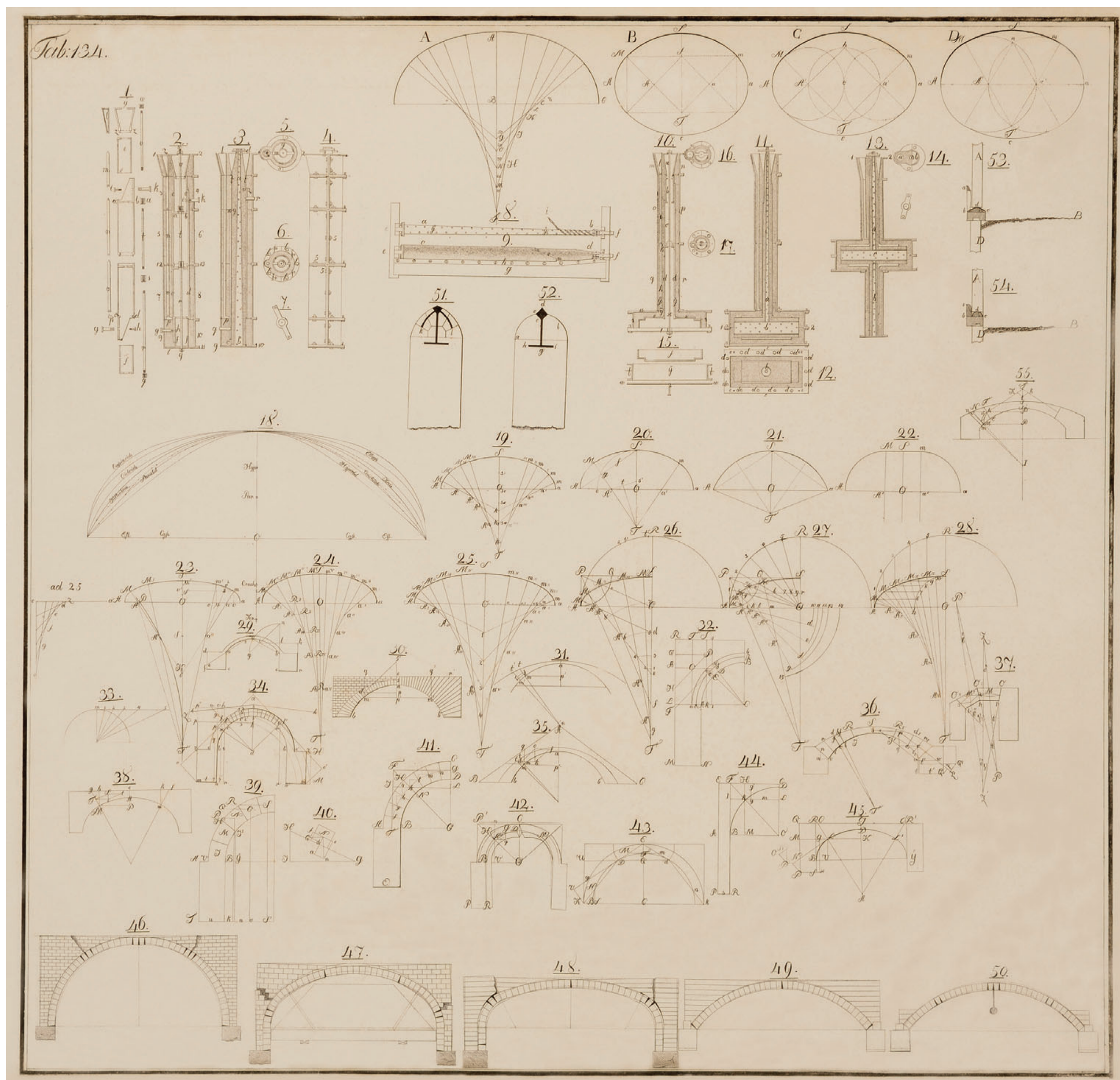


Gaztelu (Gaztelu, 1910), en línea con Morandière, sitúa los rebajamientos *L/f* entre 4 (dice que el valor 3 ya produce «indecisión» en el proyecto) y 12, valor para el que advierte que las juntas en la zona de clave son casi verticales y señala esto como «peligroso».

FIGS. 10a y b Lámina 38 de MORANDIÈRE, 1874, con los ensayos de Boistard y el alzado del muy rebajado puente de Nemours. Abajo, vista del puente de Nemours.



Antes, Wiebeking y otros autores, recuerdan la necesidad de conciliar estética y cálculo, llegando a proponer bóvedas carpaneles (de muchos centros, como hace Perronet en Neuilly) como la mejor solución para procurar la satisfacción estética de que la bóveda arranque con tangente vertical y, simultáneamente, gozar de las ventajas ya expuestas para las bóvedas rebajadas. No es que desconociesen aquellos ingenieros que el empuje horizontal hace imposible que la línea de presiones arranque en vertical (equivaldría eso al imposible de que las bóvedas no produjesen empujes horizontales), sino que una determinada y muy arraigada sensibilidad estética les hacía contemplar como más adecuado un intradós que iniciase en vertical su trazado. La figura 11a muestra un ejemplo de dichas propuestas de trazado. En la imagen de diversas directrices superpuestas (la número 18)



614

Das Verhältnifs zwischen dem kleinen Radius r und dem Winkel $A\,A^{I}\,M = A^{I}$ wird so gefunden. $O\,T = \frac{\sin. A^{I}}{\cos. A^{I}}(b - r)$, $A^{I}\,T = \frac{b - r}{\cos. A^{I}}$, $A\,A^{I} + A^{I}\,T = s\,T$ $= R = r + \frac{b - r}{\cos. A^{I}} = h + \frac{\sin A^{I}}{\cos. A^{I}}, (b - r)$, daher $r = \frac{h \cos. A^{I} + b \sin. A^{I} - b.}{\cos. A^{I} + \sin. A^{I} - 1}$

Wir sehen, dafs, jemehr sich der Winkel A^{I} dem rechten annähert, desto gröfser auch R und der Raum für den Durchgang des Wassers wird. Allein die Rücksichten der Eleganz und Festigkeit fordern, dafs R und r nicht zu sehr von einander verschieden sind.

FIGS. 11a y b Lámina 134 de WIEBEKING, 1811-1814. Configuraciones variadas del intradós de las bóvedas, con especial énfasis en las directrices carpaneles o policéntricas.
Abajo, fragmento del texto del mismo autor con expresiones analíticas para definir la secuencia de centros de las bóvedas policéntricas.

se ve que, a igualdad de luz y de flecha, la curva que deja más espacio, desagüe, es la elíptica[1], de difícil trazado práctico, sustituyéndose de hecho por la carpanel o policéntrica, de más fácil replanteo. El propio Wiebeking hace un esfuerzo ímprobo por definir las expresiones analíticas que se aplicarían a la determinación del intradós, lo que no deja de parecer un alarde innecesario en un momento en que el cálculo era muy complejo y la valoración de expresiones trigonométricas era muy dificultosa, en comparación con la experiencia práctica de siglos con directrices fáciles de construir y de probada eficacia. Probablemente hay que entender este esfuerzo en el contexto de una Ilustración que, en lo técnico-científico, se afanaba por dejar constancia de la fuerza que la Física y las Matemáticas tenían en la ingeniería, lo cual era expresión intelectual depurada y racional de la belleza, que siempre interesó a los ingenieros.

Elección del canto en clave y forma del trasdós

El paso siguiente es definir el mejor canto *c* para la bóveda, tomando como referencia el valor en clave. El planteamiento del problema exige, en primer lugar, conocer la directriz y el espesor de la bóveda en otros puntos, como sabemos hoy al analizar las líneas de presiones. Las ratios clásicas romanas cifraban el valor en $c/L = 10$, aproximadamente, como ya se ha indicado, bajándolo hasta casi $c/L = 20$ en el caso del puente Bibey (Durán, 2005). Según Wiebeking (Wiebeking, 1811-1814), otros clásicos como Palladio, Alberti, Serlio o Gauthier planteaban ratios intermedias y más bien conservadoras, entre 1/12 y 1/15. Los constructores medievales, probablemente mediatizados por más penurias, fueron más atrevidos, lo que ahorraba cimbras, acudiendo a bóvedas más esbeltas que el 1/20 (no es raro 1/40), pero estables, como ha estudiado Ramos (Ramos, 2015) y se refleja en la figura 12, en la que se ve que las bóvedas pueden ser más esbeltas a medida que crece el rebajamiento, supuesta una determinada altura de relleno rígido en el trasdós. Perronet, en Neuilly, y el propio Wiebeking adoptan como criterio la ratio 1/24, advirtiendo que acudir a esbelteces muy elevadas aumenta las presiones en los materiales acercándose a su agotamiento. Como puede verse en la figura 13, un aspecto muy importante, que desarrolla también Wiebeking, es el del mayor canto en hombros y riñones, perceptible también en el puente de Nemours [FIG. 10a], lo que confiere a estas estructuras, si no hay movimientos en los estribos, o giros o descensos en las pilas, una capacidad resistente enorme frente a las sobrecargas. No es casual la similitud del canto de la bóveda

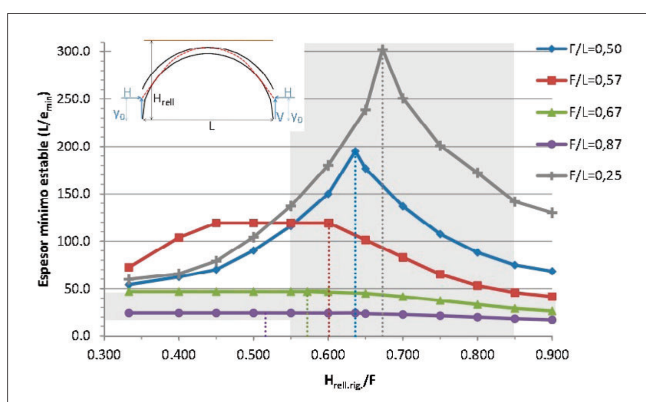


FIG. 12 Valores de la esbeltez máxima que pueden adoptar bóvedas de diferente rebajamiento en función de la altura del relleno rígido. Como puede verse, cuanto mayor es el rebajamiento, mayor es la esbeltez aceptable y menor la altura del relleno rígido necesario para garantizar el equilibrio. Figura tomada de RAMOS, 2005.

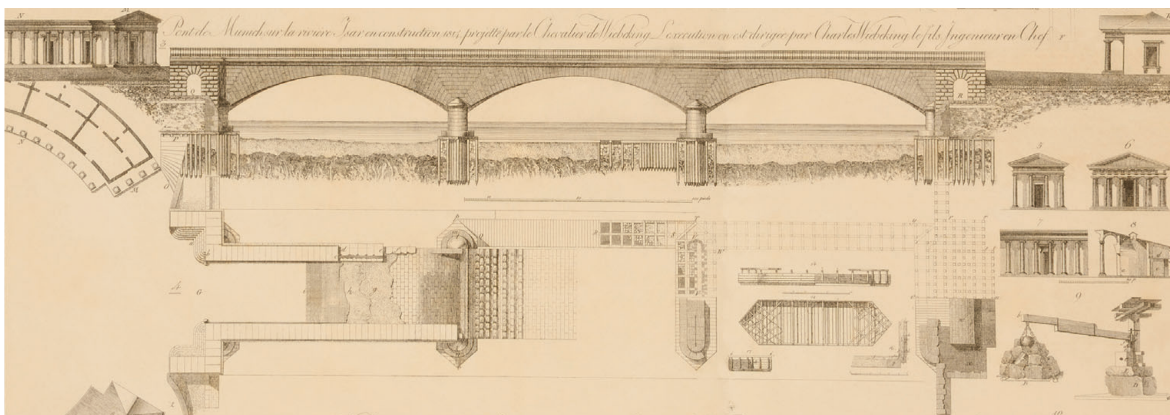


FIG. 13 Lámina 133 de WIEBEKING, 1811-1814, que muestra el alzado y la planta del puente de Múnich, sobre el Isar, proyectado por Wiebeking en 1814, con una relación c/L = 1/24, igual que la utilizada por Perronet en Neuilly (no tengo constancia de que exista este puente en el momento presente).

en Múnich (ya no existe ese puente) y en Nemours con la configuración del arco de Maillart en Salginatobel.

En la figura 14a se sintetizan gráficamente las propuestas de canto en clave en función de la luz, que no adoptan realmente valores constantes sino que son función de la luz y de otros parámetros como la altura de pila o el tipo de rebajamiento. Se trata de expresiones empíricas (el propio Gaztelu propone una, muy utilizada en España) que se ajustan a las expresiones propias y ajenas ya recopiladas por los citados tratadistas.

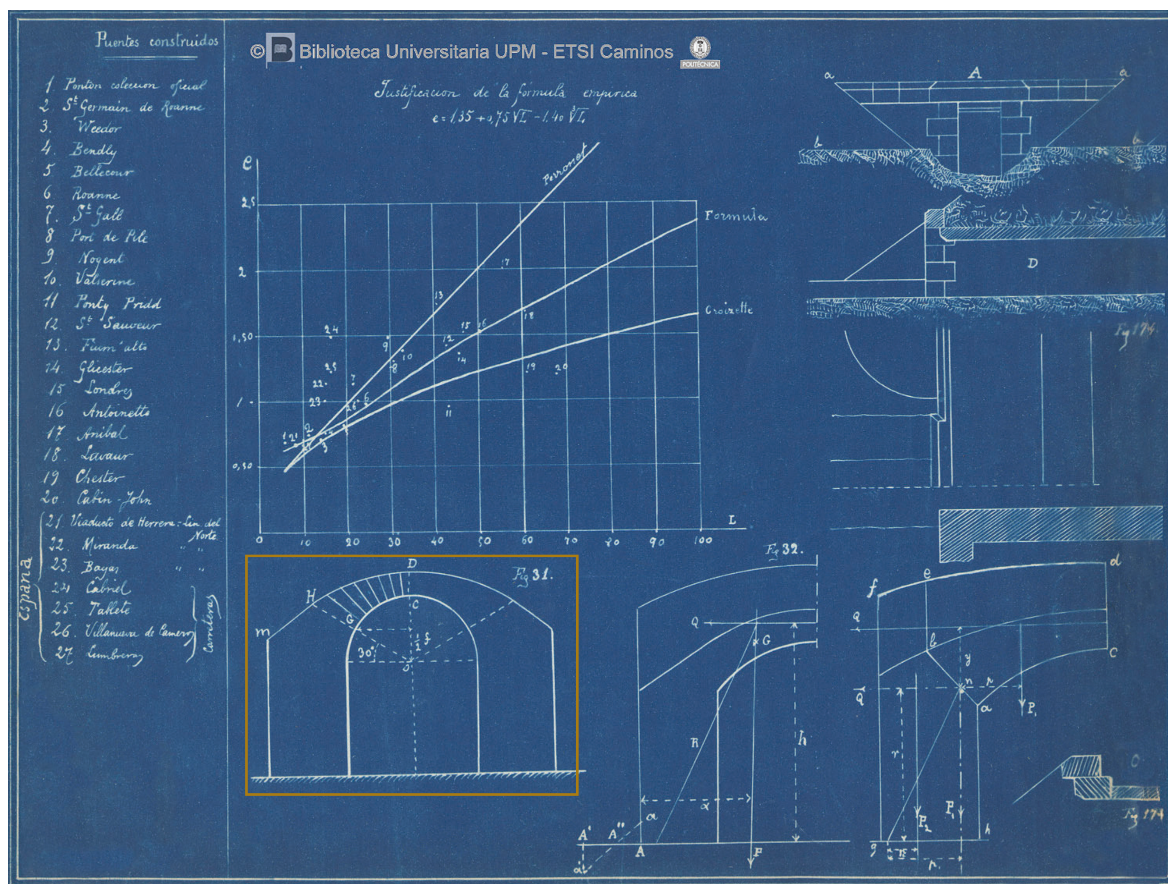
En cuanto al trasdós, es también Gaztelu quien sintetiza los criterios para la forma del trasdós de las bóvedas, conocido ya el canto en clave y el rebajamiento, como se recoge en misma figura (buscar en ella la fig. 31). En la figura 14b he redibujado la casuística que Gaztelu plantea para bóvedas de medio punto, carpaneles y escarzanas, respectivamente, supuesto conocido también el espesor E del estribo.

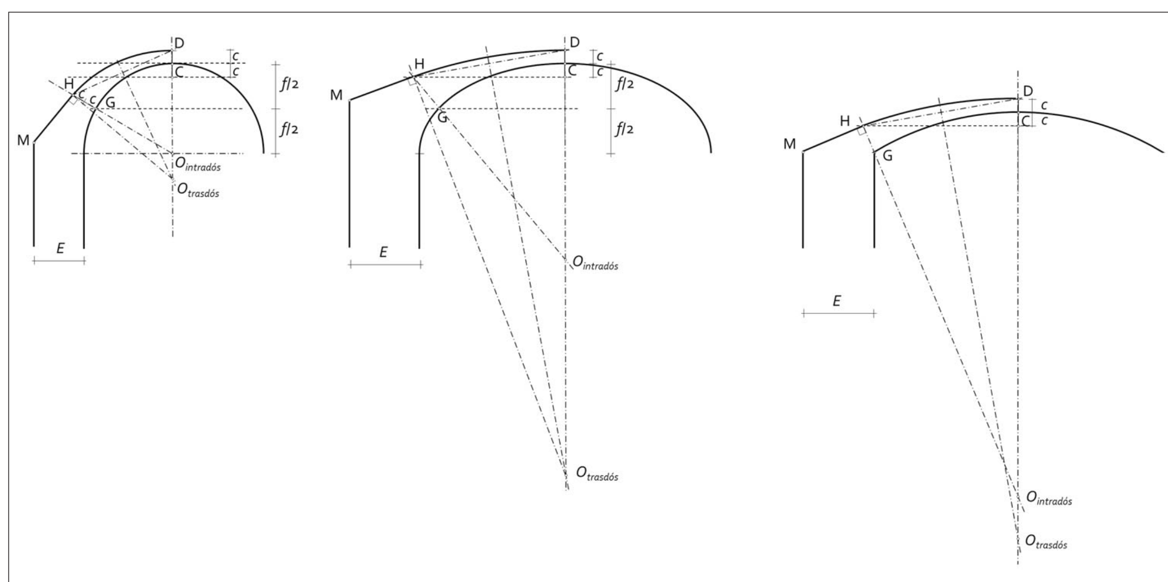
Espesores de estribo y de pila

Sucede con estos datos lo que con el canto en clave: se fueron proponiendo valores empíricos de los que se da (Gaztelu, 1910) una síntesis cumplida. Para las pilas, a partir de finales del siglo XVIII (Perronet), se daban ratios entre 1/6 y 1/10 de la luz L. Otros criterios más sofisticados planteaban espesores de pila entre 2 y 2,5 veces el canto en clave c y, cuando la altura de pila empezaba a ser grande (caso de los viaductos ferroviarios), se tomaba, conservadoramente, $2{,}5\ c + h/10$, siendo h la altura de la pila.

ELECCIÓN Y ENSAYO DE MATERIALES

La configuración más bien ciclópea de las construcciones de piedra o ladrillo de la Antigüedad y hasta bien entrado el siglo XVIII (con la excepción, relativa, en el ámbito edificatorio de las catedrales góticas) estaba condicionada por la necesidad de asegurar la estabilidad frente a la formación de mecanismos cinemáticos de colapso (número sufi-





FIGS. 14a y b Lámina XX de GAZTELU, 1910, que recoge las propuestas de canto y la forma de seleccionar el trasdós en los puentes del siglo XIX y principios del siglo XX.

En la parte inferior se presentan las construcciones gráficas con algo más de detalle para las bóvedas de medio punto, carpaneles y escarzanas, respectivamente, con el criterio de que la «línea de rotura», situada a *f*/2, sea el punto de paso de la recta radial a partir de la que se mide (punto G), en la bóveda circular, un segmento de longitud igual a dos veces el canto en clave. El trasdós es el arco de circunferencia que pasa por H y D y tiene su centro en el eje de la bóveda. El segmento MH es tangente al trasdós desde la vertical del trasdós del estribo. En bóvedas carpaneles, el punto G se obtiene como intersección del intradós con la recta horizontal que dista del intradós de clave una distancia igual al canto en clave *c*. En las bóvedas escarzanas, el punto G se obtiene de manera semejante al caso de las carpaneles. La «línea de rotura» guarda relación con los puntos de aparición de rótulas, como se muestra en la figura 10.

ciente de rótulas en las bóvedas o vuelco o deslizamiento de pilares y muros). Como es sabido, y lo mencionan autores como Gauthey[2] (Gauthey, 1843), Wiebeking, Soufflot y Rondelet (autores del Panteón de París), las tensiones de compresión a las que se veían sometidas las fábricas clásicas o convencionales eran muy pequeñas y estaban muy lejos del agotamiento en compresión. También el rozamiento parecía suficiente en la práctica y, además, la debilidad de las juntas (tendeles) se combatía con la orientación y aparejo adecuado de los sillares y ladrillos.

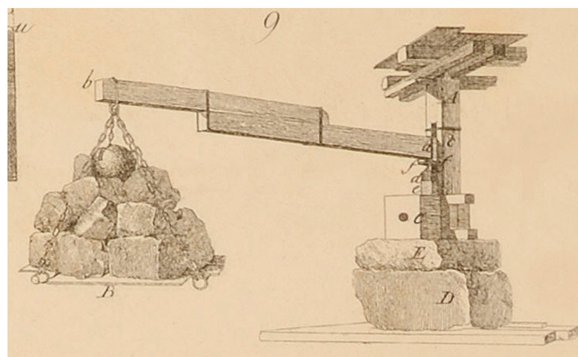


FIG. 15 Detalle de la figura 9 de la lámina 133 de WIEBEKING, 1811-1814, en la que se muestra el esquema de la máquina de ensayos hasta rotura sobre piedras talladas o prismas de fábrica (elemento *C* en la figura).

Sin embargo, el rebajamiento de las bóvedas y la estilización de pilas y muros trajeron consigo un aumento del nivel tensional, que empezaba a ser objeto de cálculo a partir de las propuestas de Bernoulli o Navier, en el gozne de los siglos XVIII y XIX. En el último cuarto del XVIII aparecen documentos de Gauthey y otros ingenieros con resultados de ensayos sobre piedras talladas y el modo en que se llevan a cabo, como narra Wiebeking. De ello se sirve también Perronet cuando proyecta el puente de Neuilly, de bóvedas rebajadas y pilas que baten un récord de esbeltez en el momento (1774).

La figura 15 muestra el esquema de la máquina de ensayos utilizada. Wiebeking analiza la cuestión de la capacidad resistente leyendo los tratados de Gauthey, Rondelet y otros autores, preocupado por el puente que está proyectando (figura 13). Recoge la evidencia de que las muestras prismáticas de piedra tallada, cuando son homogéneas y de buena calidad, se rompen en forma de pirámides yuxtapuestas por el vértice, igual que sabemos hoy que hacen las probetas de hormigón. Va más allá y detecta que, cuando la carga aplicada es excéntrica, se produce el hendimiento de las piezas, de manera tanto más brusca cuanto mayor es la calidad de la piedra, en una expresión, aún no explicita con criterios modernos, de que más resistencia puede traer consigo también mayor fragilidad. En todos los ensayos se toma nota del peso específico de las probetas, en la certera idea de que cuanto más densa y compacta es la roca, mayor es la capacidad resistente.

Wiebeking observa que la resistencia de dos prismas apilados es el 60 % de la de un prisma de una sola pieza de iguales dimensiones totales, con junta a hueso pero con superficies pulidas. La resistencia de una pila de tres prismas cae al 55 % de la de un prisma de una sola pieza. Deduce, con lógica, que la caída de resistencia se va atenuando cuando se consideran más hiladas, llegando a un valor asintótico del 50 % aproximadamente.

También puede verse que pequeñas diferencias en el peso específico de las rocas (de un 6 % en las muestras analizadas por estos clásicos) se traduce, *grosso modo*, en una resistencia por encima del 20 % mayor, es decir, la razón de resistencias crece con el cubo de la razón de pesos específicos. En ese sentido, los maestros aconsejan buscar rocas de grano fino, compactas y muy homogéneas, recomendación que conoce bien cualquier cantero.

Se trata de observaciones de gran interés que se han confirmado muchos años después con modelos fenomenológicos (último cuarto del siglo XX) y que relacionan los resultados

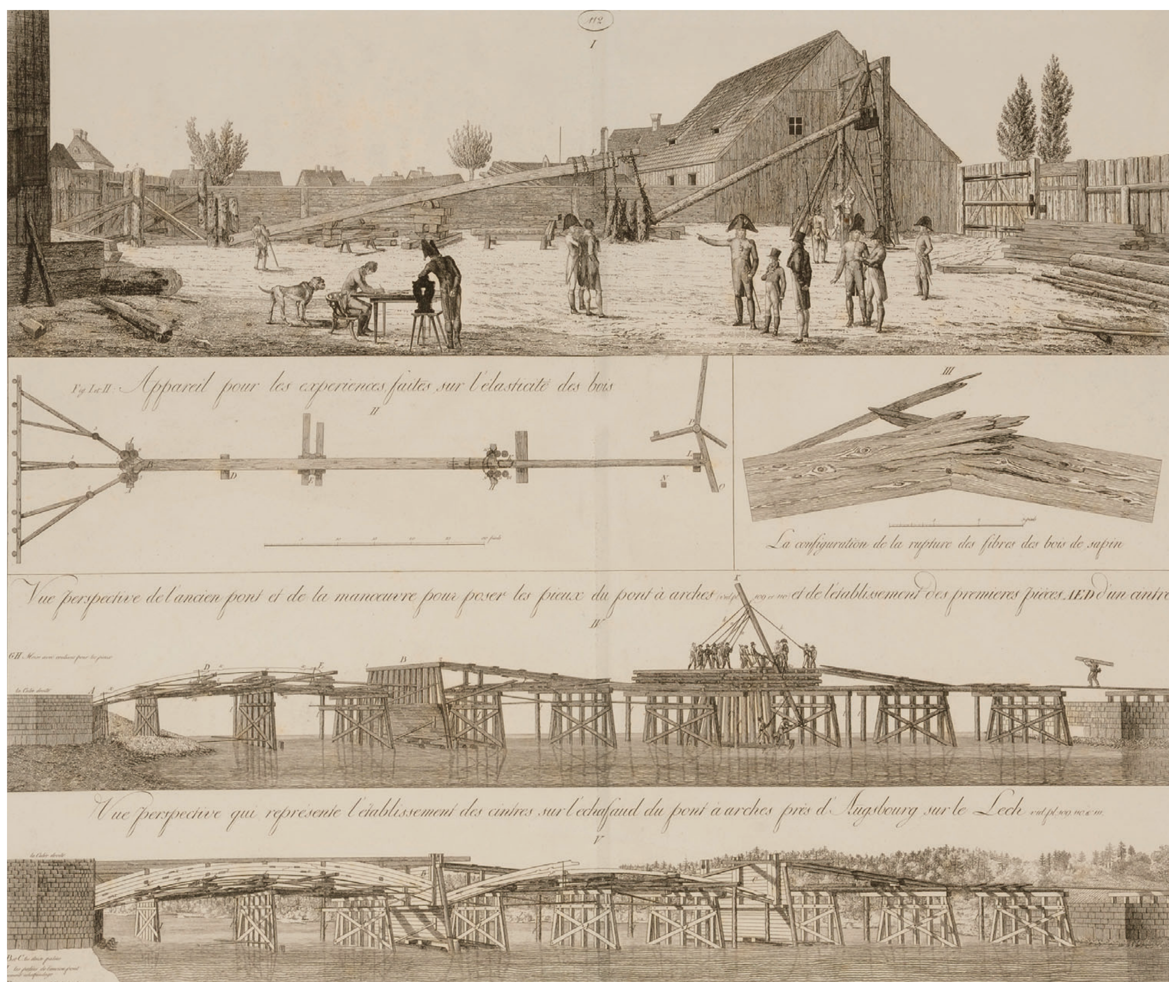


FIG. 16 Lámina 112 de WIEBEKING, 1811-1814, en la que se muestran, en la parte superior, los ensayos a flexión realizados sobre rollizos de madera, incluyendo la forma de rotura.

obtenidos con la seguridad estructural. A tenor de lo observado en los ensayos, Wiebeking dimensiona las piezas para que las tensiones deducidas del análisis simple sean, como mucho, 1/10 de la resistencia obtenida en los ensayos de prismas de piedra, como hacen otros autores de su época, manteniéndose ese criterio hasta principios del siglo XX (Gaztelu, 1919). Obsérvese que el «coeficiente de seguridad global» frente al agotamiento por compresión de las fábricas no es 10, sino algo así como la mitad, al tener en cuenta el valor mitad de la resistencia de la fábrica aparejada con relación a la resistencia individual de las piezas. Por cierto, este resultado puede ser peor en el caso de los ladrillo, aunque el número de puentes de ladrillo es muy pequeño con relación al de los de piedra.

Cabe añadir como curiosidad que Wiebeking utiliza, en esta parte de su tratado, el sistema métrico decimal, que llevaba aún apenas una década funcionando, y no de manera simultánea en todos los países de Europa, lo que da idea del espíritu ilustrado y hasta se diría que paneuropeo de este gran ingeniero.

Añádase que también se hacían ensayos de madera, como se recoge en la figura 16, a partir de ensayos del propio Wiebeking para un puente de madera, su especialidad más notable en ingeniería estructural, si bien las conclusiones eran absolutamente válidas para las cimbras de los puentes de piedra.

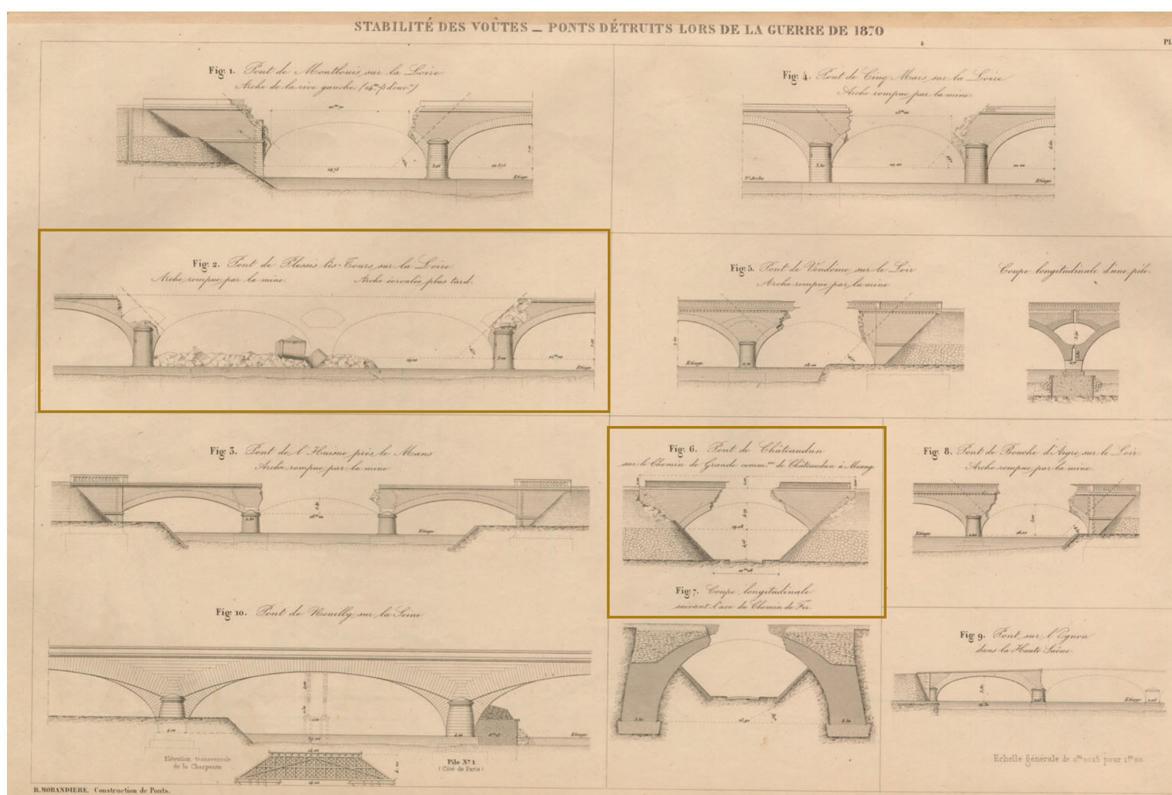


FIG. 17 Lámina 44 de MORANDIÈRE, 1874, que muestra el estado de algunos puentes volados por razones estratégicas durante la guerra franco-prusiana de 1870 y que, contrariamente a la previsión de los cálculos, se mantenían en pie.

Morandière (Morandière, 1874) hace un comentario que pone bien a las claras cómo la curiosidad por entender la evidencia observada es el motor del conocimiento. A pesar de que los cálculos de estabilidad de bóvedas y, particularmente, de estribos y pilas, predirían el colapso en dominó de las bóvedas, algunas ruinas resultado de las acciones de la guerra franco-prusiana de 1870 pusieron de manifiesto que no siempre se desencadenaba ese proceso [FIG. 17]. El propio Morandière explica este fenómeno porque la cohesión de las fábricas significa resistencia a tracción[3], lo que hace que, en términos que utilizamos en la explicación del comportamiento de estructuras de hormigón en masa o débilmente armado, las tracciones que admiten piezas y morteros, con secciones tan grandes, permiten que las líneas de presiones salgan fuera del contorno de la pieza. Lejos de ser un «fallo» del modelo, este resultado permitió a los ingenieros de la época entender que los métodos de cálculo eran solo herramientas para proyectar en condiciones de seguridad, a partir de hipótesis muy razonables, pero también que tales modelos no son leyes físicas que explican universalmente el comportamiento hasta rotura, ni falta que hacía.

Así, puede observarse que se han formado dos ménsulas considerables en la estructura que, dentro de la figura 17 mostrada arriba, se identifica como fig. 6. Es evidente que la estabilidad detectada solo se puede entender si se atribuye a la resistencia a flexión de los dos voladizos. En la fig. 2 (dentro también de la figura 17) se aprecia la pila volcada hacia la izquierda, síntoma inequívoco de que, en este caso, la bóveda situada a la derecha de esa pila empujó a esta al ser volada la primera bóveda (a la izquierda de la pila volcada) y desaparecer, provocando el vuelco y la ruina de esa segunda bóveda. Otra muestra de cómo el conocimiento estructural se nutre de la ingeniería forense, especialmente a la

hora de establecer los riesgos de los que es preciso asegurarse, como se ha venido haciendo siempre aunque no sea muy conocida esa praxis.

LAS CIMENTACIONES

Ya se ha señalado más arriba que las cimentaciones son el talón de Aquiles de estas construcciones, como se explica con suficiente detalle en Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica», 2008. Interesa, a partir de este punto, pasar de los planos, de lo definido en el proyecto, a la obra, así que tras el desbroce del terreno, de la preparación de las explanadas de trabajo, de las monteas para la labra de los sillares, se había de iniciar la ejecución de las cimentaciones de pilas y estribos.

Si el terreno es rocoso o muy competente, la cimentación es directa, incluso sin zarpas, es decir, la pila o estribo parten desde la roca con el mismo ancho de pila, como documenta Durán (Durán, 2005) en ciertos puentes romanos.

En otros casos, era preciso acudir a cimentaciones semi-profundas o a pilotes, siempre de madera. A partir de mediados del siglo XIX se empezaron a utilizar cajones de hormigón en masa.

Una de las tareas más complejas era la de procurar trabajar en seco, en el cauce, aunque la roca estuviese muy cerca. Ello obligaba a construir penínsulas. Perronet (Perronet, 1784) describe el proceso según el cual desde una pasarela provisional, paralela al eje del puente y útil para las tareas posteriores, se vertía escollera, preferentemente de manera simultánea por quienes ocupasen la pasarela, como recoge la figura 18.



FIG. 18 Lámina XIII de PERRONET, 1784-1820, descriptiva de la construcción de penínsulas con vertido de escollera sobre el cauce.

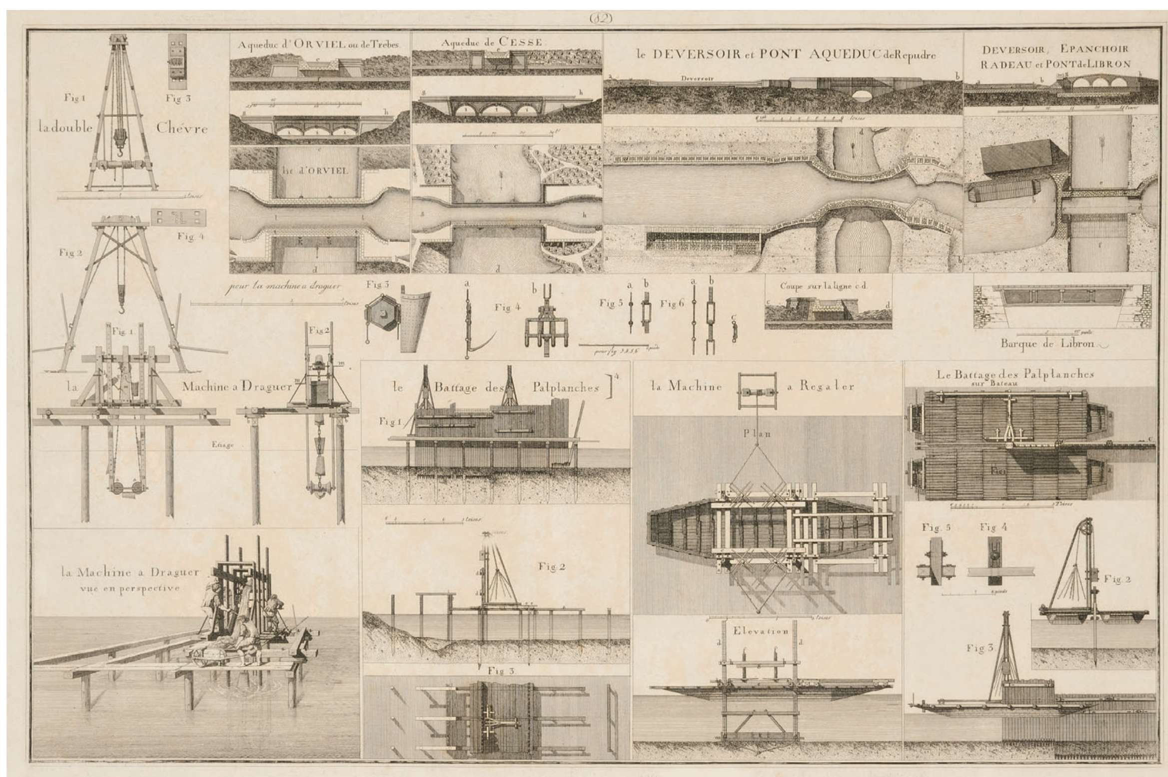


FIG. 19 Lámina 82 de WIEBEKING, 1811-1814, que presenta, en la parte inferior, las barcazas y los dispositivos de izado e hinca de las tablestacas y su nivelación y guiado (la regla superior y la sumergida), o de los pilotes provisionales, las dragas, etc.

En terrenos no explícitamente rocosos y en los lugares en los que el lecho se encontraba a mayor profundidad, era preciso construir recintos tablestacados por hinca. La misma técnica de clavado se utilizaba para los pilotes que daban soporte a la pasarela auxiliar y, por supuesto, a los pilotes definitivos de apoyo de las pilas y encepados. La hinca se materializaba bien desde las penínsulas, si era el caso, bien desde plataformas flotantes constituidas por barcazas equipadas *ad hoc*, como se muestra en la figura 19.

La figura 1, al comienzo de este texto, muestra el proceso constructivo del puente de Orleans, en el que se aprecia también el propósito de estos recintos, así como un conjunto muy amplio de otros dispositivos, como plataformas para cabrestantes tirados por caballos, rampas, grúas, bombas de cangilones, etc.

La finalidad de los tablestacados era la de configurar, casi siempre mediante doble pantalla, un recinto estanco interior en la zona en que se construiría una pila o estribo. Entre ambas pantallas se vertía arcilla para asegurar la impermeabilidad del conjunto. En León y Bauder, 1999, se explica con algún detalle todo este proceso referido al puente de Neuilly, de Perronet. Se trata de un conjunto de actuaciones que hoy día siguen sorprendiendo por el ingenio y la audacia de quienes las planearon y llevaron a cabo.

En la figura 20 se presenta un muestrario general de los dispositivos utilizados, y en la figura 21 se muestra, con más detalle, el proceso de hinca. Como describe Perronet, un conjunto de operarios, dirigidos por un capataz, izaba el martinete, de unos 600 kilos de peso, y lo dejaban caer desde su máxima altura contra el pilote, protegido por una sufridera. La punta del pilote estaba protegida por un azuche o por la superficie carbonizada de la madera en la punta, para facilitar la hinca. Se consideraba que la hinca se daba por

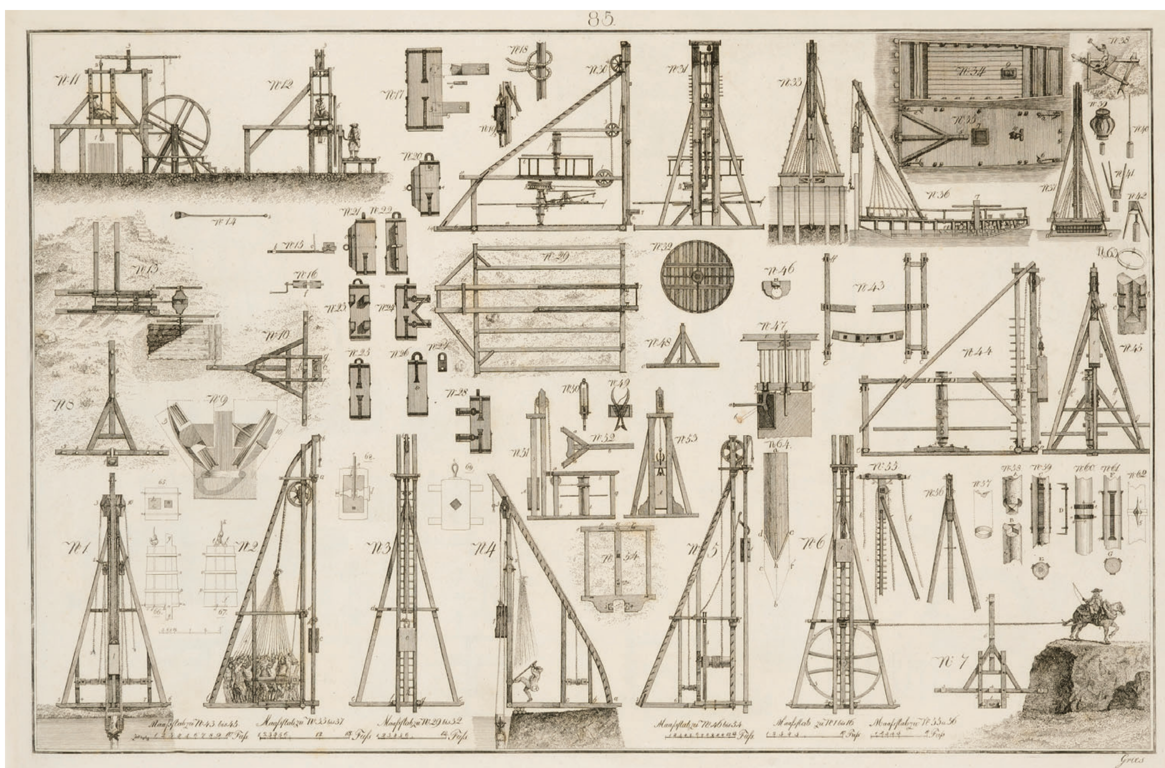


FIG. 20 Lámina 85 de WIEBEKING, 1811-1814, que, como en otras, sigue muy de cerca las descripciones de Perronet, con algunos datos adicionales. Se puede apreciar la descripción de dispositivos como taladradoras para la piedra, pilotes, azuches, sufrideras, grúas, polipastos y, especialmente, las máquinas de hinca de pilotes y tablestacas y también las de su extracción.

terminada cuando se producía el rechazo o, convencionalmente, la diferencia entre los recorridos de dos andanadas de golpes no pasaba de los 2 o 3 mm. Llama la atención el paradójico proceso de extracción de tablestacas o pilotes provisionales, a base de golpes igualmente hacia abajo con el martinete. Se alcanza a entender el proceso en la parte derecha de la figura 21 (nº 4), en la que se ve cómo un operario está presto para tirar hacia arriba y aprovechar así el efecto rebote del pilote al recibir el impacto del martinete, que los otros operarios se ocupan de izar inmediatamente. Cabe añadir que los diámetros de los pilotes de madera rondaban los 30 cm (un pie, aproximadamente) y que las distancias libres entre ellos rondaban los 40-60 cm.

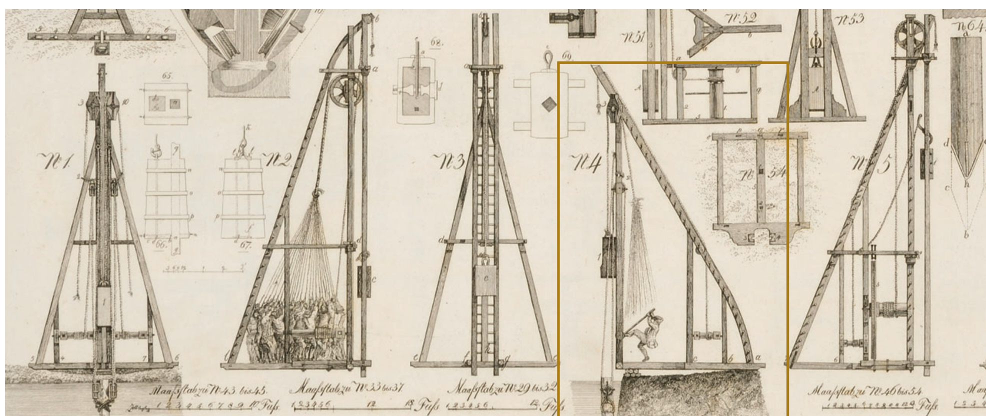
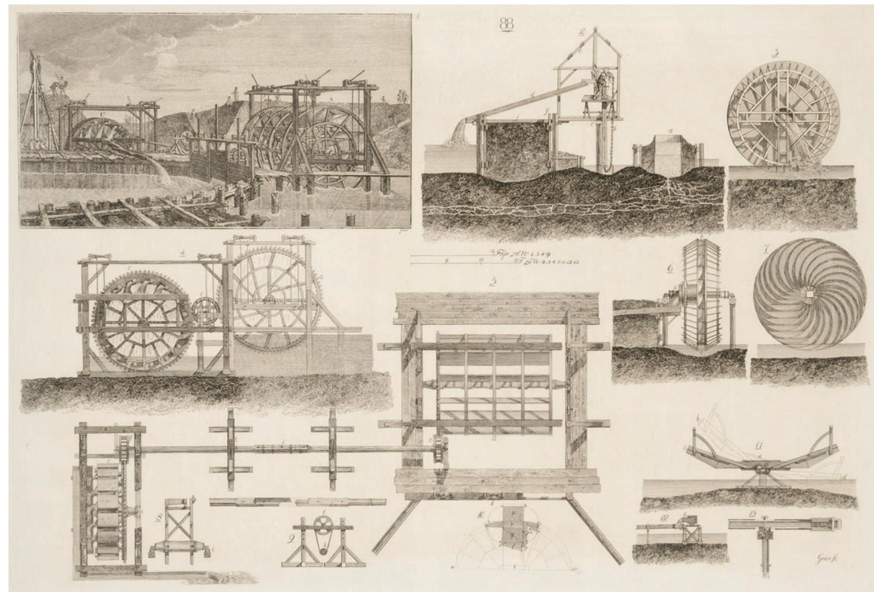
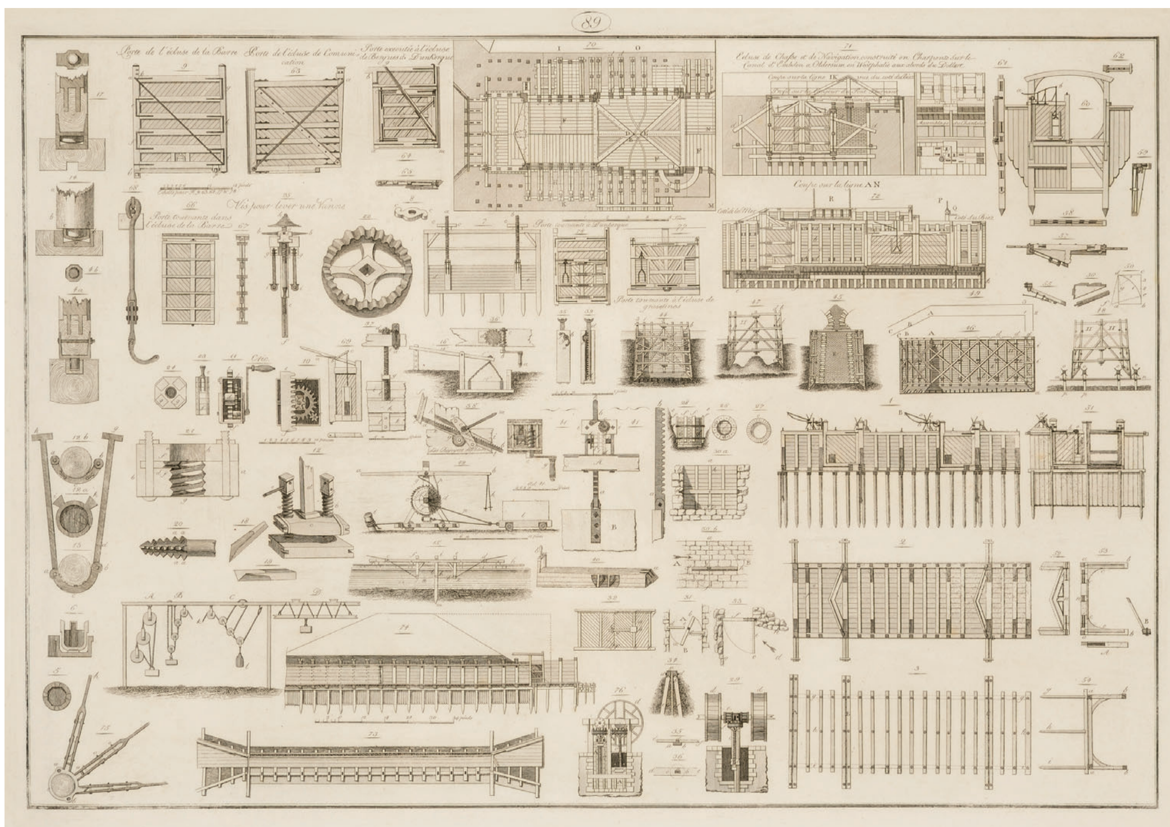


FIG. 21 Detalle particular de la figura 20.

Las figuras 22a y b muestran otros dispositivos como bombas, válvulas, husillos, etc. Aunque se copiaban unos de otros, todos los elementos eran objeto de definición por parte del proyectista e ingeniero director de las obras (la misma persona aunaba los dos cargos en aquellas épocas), lo que da fe, también en los pequeños detalles, de lo prolijo que podía ser el proyecto y del mimo dispuesto en la redacción de las correspondientes Memorias y láminas o planos del proyecto de liquidación, que hoy podemos disfrutar. Todo un despliegue de ingenio y valentía en una época en que no había fuerza motriz aparte de la hidráulica o la muscular de hombres y bestias.





FIGS. 22 a y b Láminas 88 y 89 de WIEBEKING, 1811-1814, que muestran dispositivos muy variados de drenaje, bombeo, sellado de venas de agua con chimeneas, etc., prensas, eslingas, brocas, etc.

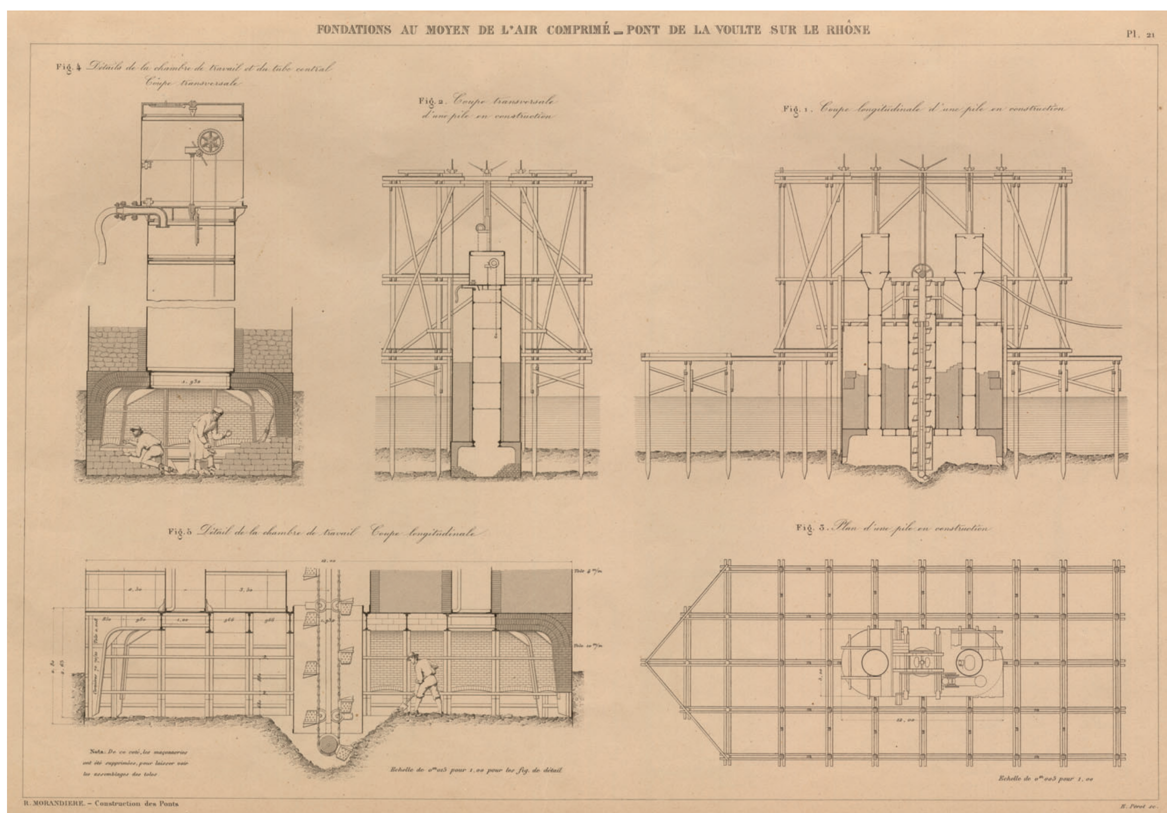


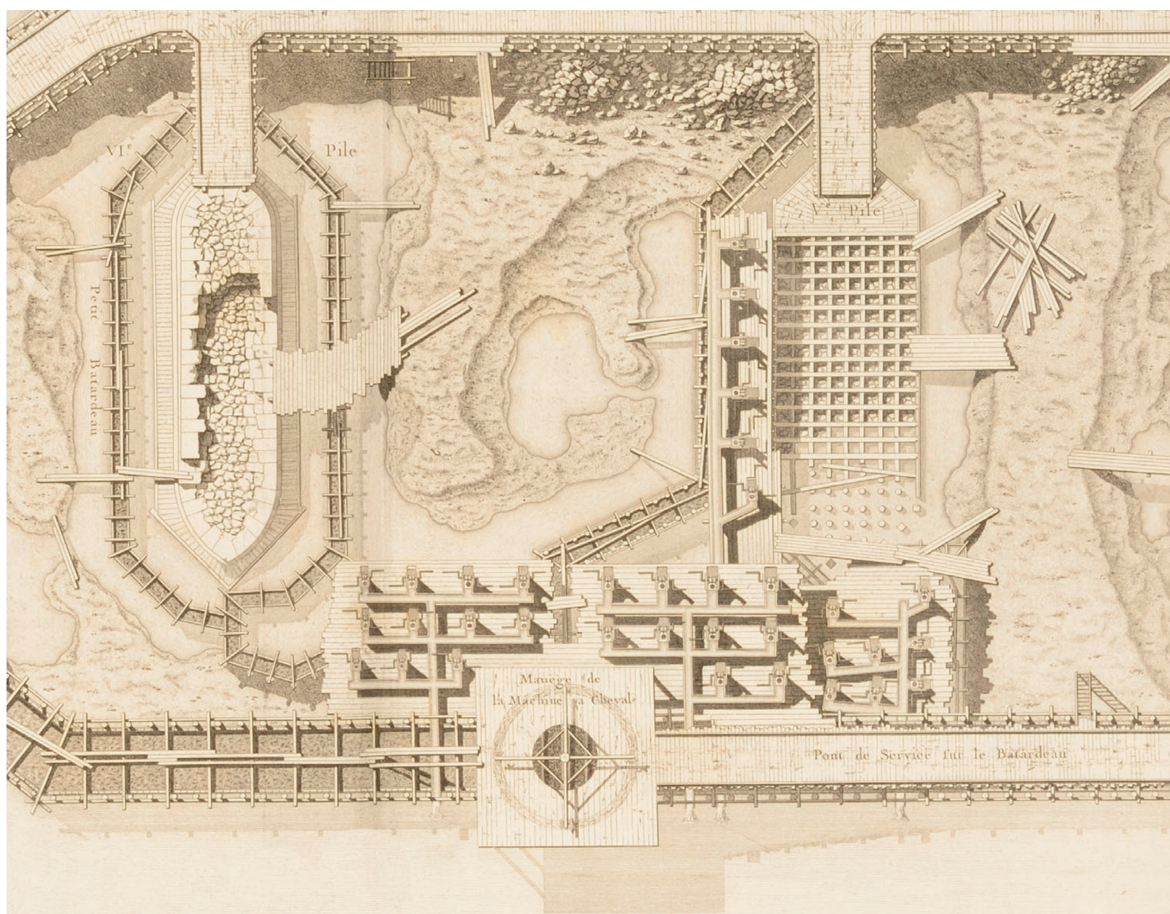
FIG. 23 Lámina 21 de MORANDIÈRE, 1874, describiendo algunas cimentaciones con cajones de aire comprimido.

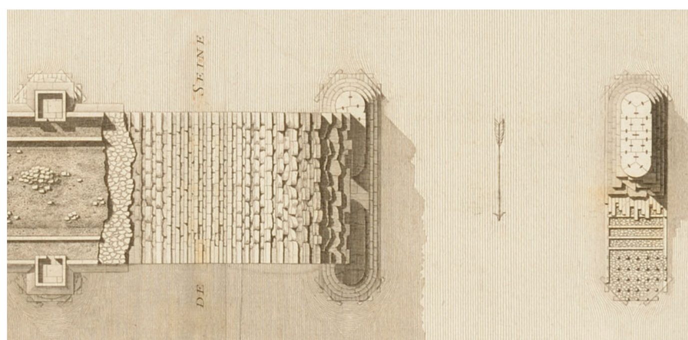
Finalmente, la figura 23 presenta un ejemplo de cimentación ejecutada unos 100 años después de los ejemplos anteriores, con cajones de aire comprimido.

PILAS Y ESTRIBOS

Sobre la roca o solera, o sobre el encepado de pilotes, es decir, sobre el entarimado que cubría el emparrillado de vigas de madera dispuestas sobre las cabezas de los pilotes, se disponían los sillares del zócalo o base de las pilas o de los muros de estribo o sus muros en vuelta, como se puede ver en las figuras 1, 9 o 13 de este texto.

También se puede advertir la configuración de las pilas, y aun de los muros, a base de unas hojas exteriores de sillería o mampostería y un relleno cementado a base de calicanto o, ya desde mediados del siglo XIX, hormigón en masa o ciclópeo. Los sillares exteriores iban frecuentemente atados entre sí mediante grapas o piezas en cola de milano, como explican Durán (Durán, 2005) y Morandière (Morandière, 1874), entre otros muchos autores. Hay que pensar que la construcción podía verse interrumpida durante las crecidas, las guerras o los periodos de escasa disponibilidad presupuestaria, lo que obligaba a dejar las hiladas de piedra, sin carga vertical sobre ellas si aún no se habían podido voltear las bóvedas, expuestas a la corriente, que lavaría los tendeles y las llagas y dejaría muy expuestos los sillares al deslizamiento. Las figuras 24a y b muestran que el cosido de los sillares era más bien opcional. Así, en la figura superior se observa que los sillares no están cosidos, pero sí en la inferior, correspondiente a pilas mucho más esbeltas.





FIGS. 24 a y b Láminas XLI y XLVII de PERRONET, 1784-1820, que permiten identificar la configuración de los encepados de pilotes, con un emparrillado sobre las cabezas de estos y, por encima, el entarimado sobre el que descansan las hiladas de los sillares. En la figura superior, correspondiente al puente de Orleans, no aparecen cosidos los sillares, quizás por el mayor tamaño de las pilas, mientras que en la figura inferior, del puente de la Concordia, los sillares sí están cosidos entre sí, pertenecientes a unas pilas mucho más esbeltas.

LA CONSTRUCCIÓN DE LAS BÓVEDAS

Se trata de uno de esos aspectos fascinantes que rodean a los puentes de piedra o ladrillo y que, como las cimentaciones, no son suficientemente conocidos. Se contempla la obra terminada y se admira el resultado, pero apenas se conoce cómo se construyó. Este hecho es, naturalmente, común a otras construcciones, como catedrales o castillos, y es uno de los aspectos en los que, a mi juicio, cabe aun mucha investigación y pedagogía.

A diferencia de los muros o de las pilas, elementos en los que no son precisas las cimbras, aunque sí andamios y grúas para dar acceso a personal, materiales y equipos, las

bóvedas requieren de estructuras auxiliares de enorme responsabilidad que sostengan a la bóveda mientras se construye, pues esta no funciona autónomamente hasta que no se completa su geometría, al menos por roscas.

O'Connor (O'Connor, 1993) y Durán (Durán, 2005) dan cuenta de que los romanos disponían las primeras dovelas de las bóvedas sin cimbra, puesto que el rozamiento es suficiente para asegurar el equilibrio hasta un ángulo, medido desde el centro, sobre la línea de arranques, que apenas llegaba a unos 27º [4], de forma que la cimbra era necesaria para salvar una luz algo más pequeña (algo menos del 75 % de la luz libre de partida) si se utilizaban sillares con labra fina, como la de los romanos. De los romanos se sabe que apoyaban la cimbra bien en las impostillas, bien en piezas sobresalientes a modo de ménsulas cortas o en maderos empotrados en los mechinales dejados al efecto en los paramentos de pilas y estribos.

Las cimbras posteriores están descritas con bastante detalle en los tratados de Perronet (Perronet, 1784-1820), Wiebeking (Wiebeking, 1811-1814), Gauthey (Gauthey, 1843), Morandière (Morandière, 1874), Gaztelu (Gaztelu, 1910) y Séjourné (Séjourné, 1913), entre otros autores. Pueden clasificarse las cimbras en dos grandes grupos: las flexibles y las rígidas.

La figura 25 muestra con detalle la configuración de las cimbras flexibles utilizadas por Perronet en la construcción del puente de Neuilly. Como puede verse, el conjunto de la cimbra flexible consta de una serie de cuchillos formados por elementos triangulados con tablones de madera, montantes y longitudinales, enlazados por machihembrado, y arriostrados transversalmente entre sí. En la figura 26 se advierte, en la parte superior, que la flexibilidad de la cimbra obligaba a acopiar, en la zona de clave, unos pesos (dovelas) que contrarrestasen la tendencia al levantamiento o apuntamiento de la cimbra al disponer las dovelas en arranques y hacia los riñones. Se advierte también que en esa fase, antes de completar las bóvedas contiguas sobre una pila, la cimbra estaba atirantada

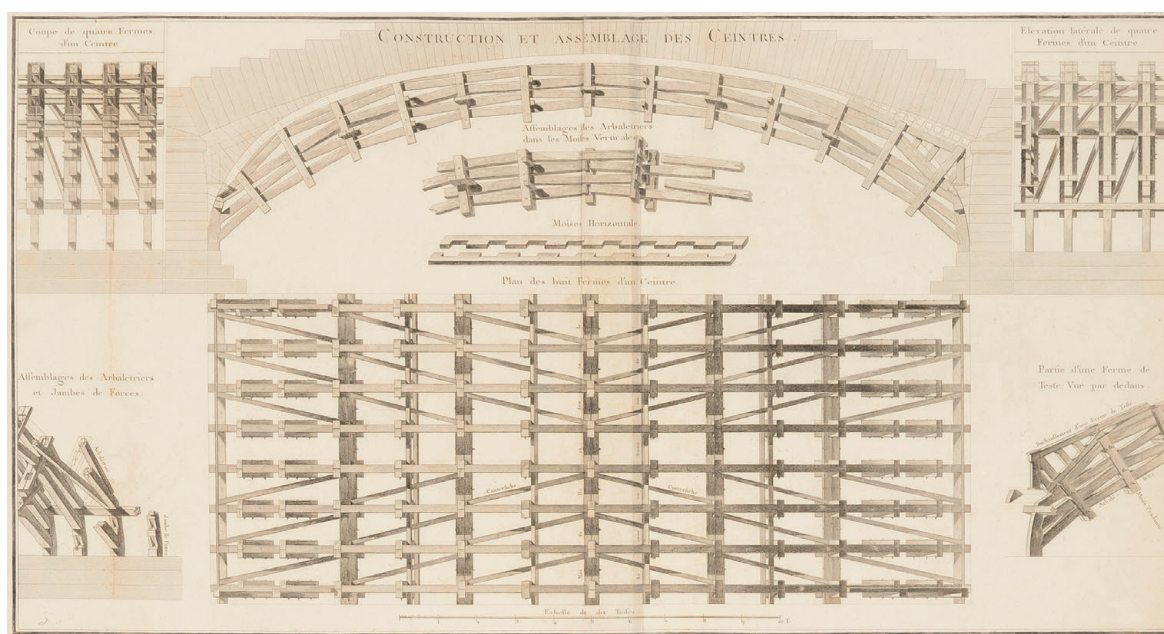


FIG. 25 Lámina V de PERRONET, 1784-1820, descriptiva de la cimbra flexible del puente de Neuilly.

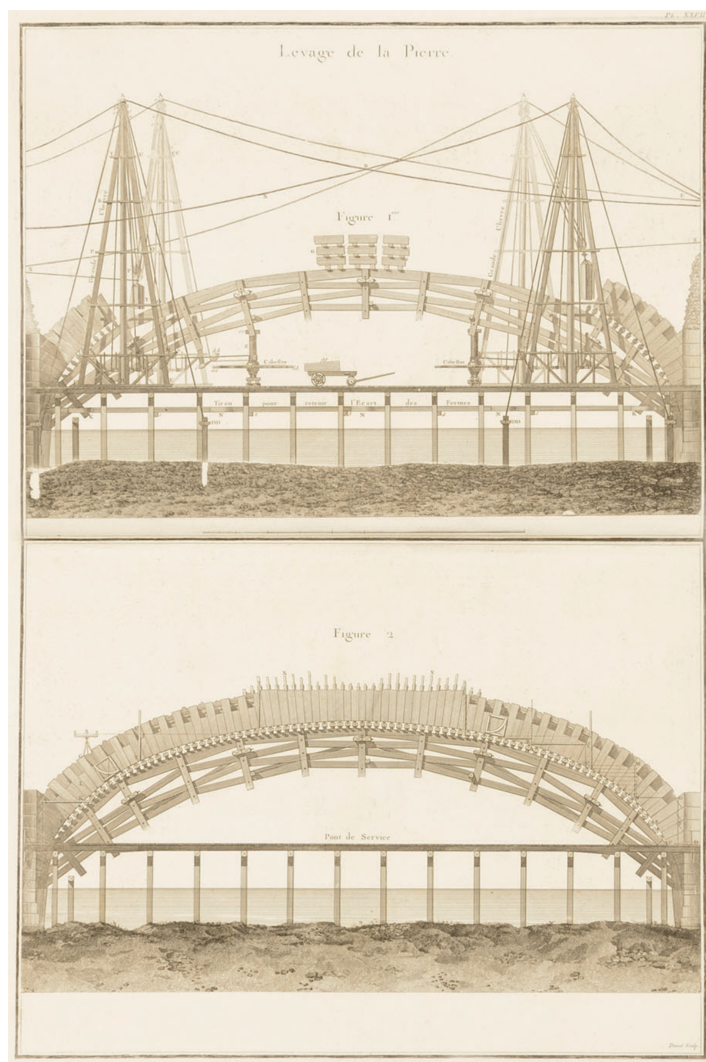


FIG. 26 Lámina XXVII de PERRONET, 1784-1820, que presenta el proceso constructivo, sobre la cimbra, de una de las bóvedas del puente de Neuilly. En la parte superior se muestran las dovelas ya dispuestas sobre arranques y avanzando hacia los riñones, con los mástiles de las grúas y el carro que suministra las dovelas circulando sobre la pasarela auxiliar. En la parte inferior se muestra la cimbra una vez completada la bóveda y retirados, por tanto, los medios auxiliares, incluido el tirante que se ve en la parte superior. También se deja constancia en la figura del empleo de niveles y medidores de ángulos para controlar, en todo momento, la adecuación geométrica del trazado y de la cimbra, lo que da una idea de lo cuidadoso de estas operaciones.

a nivel de arranques de la misma, con el fin de que no se transmitiesen a las pilas, muy esbeltas, empujes diferenciales.

La figura 26 ofrece otro detalle de enorme interés. Las dovelas no descansaban directamente sobre las piezas del trasdós de las cimbras, sino que, sobre estas y bajo cada dovela, se disponía una pareja de listones transversales, uno superior, que servía de apoyo a la dovela, y otro inferior, directamente sobre la cimbra. Entre medias se disponían unas piezas en forma de cuñas contrapeadas, de modo que la superposición de ambas piezas tuviese forma de prisma pero de manera que el deslizamiento respecto al plano inclinado diagonal permitiese el desplazamiento de las dovelas hacia arriba o hacia abajo.

En la parte inferior de la figura 26 se presenta otro detalle –que también está presente en la figura 27, a la derecha– en el que se muestra la presencia de cuñas entre las dovelas de clave y hombros de la bóveda. La razón de ser de estas cuñas es la de dotar a las dovelas dispuestas de una geometría tal que, tras el descimbrado, pase a ser la deseada, es decir, todas las juntas sean sensiblemente coplanarias. Obsérvese, en la parte derecha superior de la figura 27, que el descimbrado de la bóveda del puente de Nogent dio lugar, por acomodo de las dovelas, a una flecha del orden de 37 cm. Perronet dio cuenta de asentamientos de hasta 77 cm en el puente de Neuilly. En la parte izquierda de la figura 27



FIG. 27 Lámina 36 de MORANDIÈRE, 1874, que explica los asentamientos (*tassement* en francés) de las bóvedas por movimientos de las dovelas en diversos casos.

vemos las aberturas medidas en el puente de Nemours, que ya se mostró en la figuras 10a y 10b. Estos descensos son, al final, el resultado del ajuste instantáneo (de los primeros meses se decía) de las dovelas tras el descimbrado y, en proporción menor en los puentes de piedra, pero no menor en los de ladrillo, por tener muchas más juntas, por fluencia y retracción de los morteros, cuyo valor es del orden de 10 veces el de los hormigones más modernos, debido fundamentalmente a la preponderancia de finos. Los asientos diferidos son pequeños en los puentes de sillería de piedra (incluso de valor nulo en juntas a hueso), y tanto menores cuanto menor es el espesor del tendel en relación a la dimensión circunferencial de la dovela. Por el contrario, en puentes de ladrillo, las de-



FIG. 28 Lámina XI de PERRONET, 1784-1820, que refleja la «ceremonia» del descimbrado simultáneo de las bóvedas del puente de Neuilly.

formaciones de fluencia y retracción pueden ser muy considerables, como he podido comprobar, ya que hay muchas juntas y los tendeles suelen ser proporcionalmente mucho más gruesos en las fábricas de sillería.

Perronet y Wiebeking dan cuenta también de las ventajas de las cimbras flexibles por su mayor economía, y señalan que sus potenciales inconvenientes, derivados de la deformabilidad, se pueden prevenir sin más que tomar algunas precauciones como las ya indicadas de repartir pesos sobre la cimbra. Apuntan que, aunque se haya dispuesto mortero en las juntas de las dovelas, el que la cimbra se deforme, primero hacia arriba en clave y luego hacia abajo cuando se completa la bóveda, no tiene importancia alguna si al final se compensan sensiblemente los movimientos. Además, la aludida plasticidad de los morteros contribuía a ello.

El descimbrado de las bóvedas siempre estuvo rodeado de una cierta liturgia y de leyendas, como relatan Steinman y Watson (Steinman y Watson, 2001) a propósito del puente de San Martín en Toledo. No era para menos porque la operación, muy delicada si se cometían errores, podía dar al traste con la propia bóveda y con las pilas o, menos probablemente, con los estribos. El puente de Neuilly, que batió récords de esbeltez de pila, suscitó una inusual expectación cuando todas sus bóvedas se descimbraron simultáneamente –lo usual era cimbrar, voltear la bóveda y descimbrar vano a vano, si las pilas podían garantizar la estabilidad de la obra al recibir el empuje desequilibrado de un lado (solo con la rosca, aún sin el relleno ni los tímpanos) con respecto al otro, aún sin construir– en el contexto de una gran fiesta popular a la que acudieron el propio Luis XV y su corte [FIG. 28]. Se cuenta que el acto tuvo mucho de teatral, porque secretamente se habían aflojado antes las cuñas que se han descrito más arriba, de forma que las cimbras

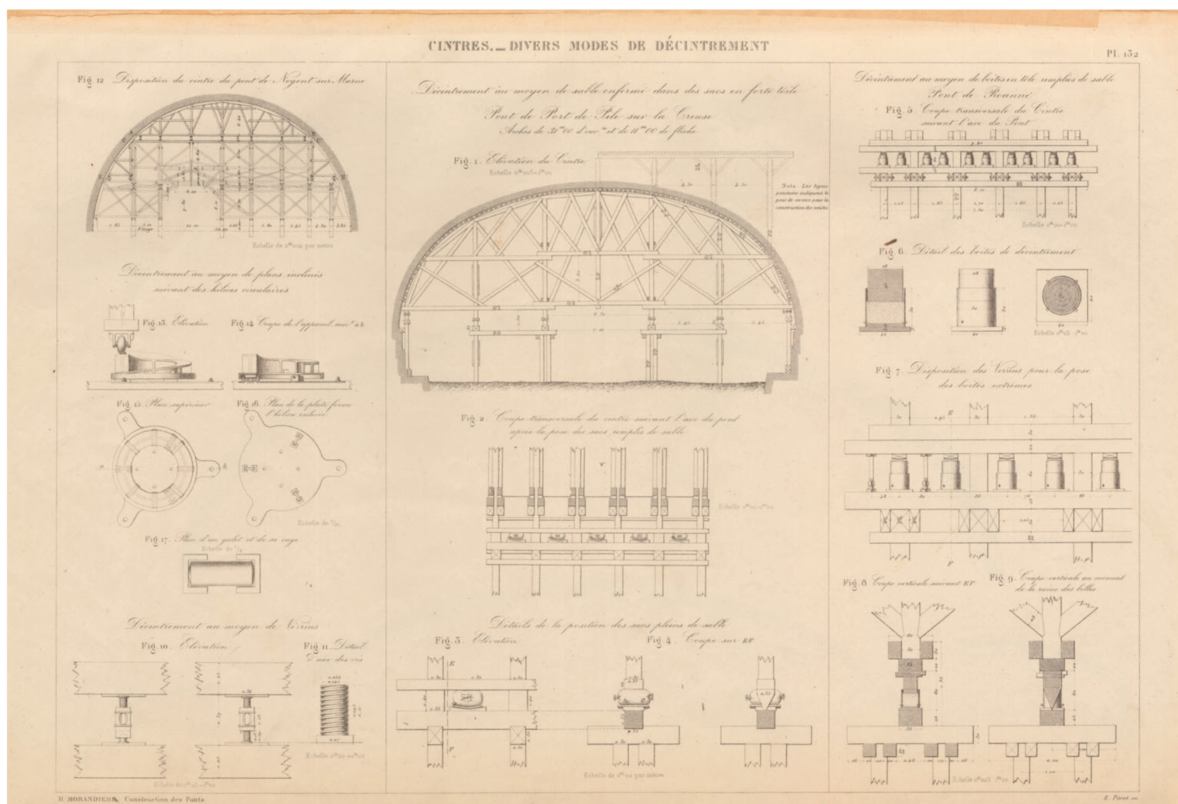


FIG. 29 Lámina 132 de MORANDIÈRE, 1874, en la que se presentan cimbras rígidas decimonónicas, así como muy variados sistemas de descimbrado, como gatos hidráulicos, cajas de arena, husillos roscados, etc.

realmente estaban apenas presentadas, sin contacto ya, contra las bóvedas, que eran autónomas.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX se fue generalizando el empleo de las cimbras rígidas, entre otras razones porque el uso cada vez más extendido de cementos portland daba lugar a morteros de mucha menor plasticidad y capacidad en fresco de los morteros para adaptarse a los movimientos[5]. En la figura 29 apreciamos ya una configuración diferente de cimbras y de procedimientos de descimbrado.

No se puede acabar esta parte del relato sin mencionar a Séjourné, quien mejoró la técnica de sus predecesores, que proyectaban la cimbra de forma que esta fuese responsable del 100 % del peso de la bóveda. Con el planteamiento de Séjourné, por fases o roscas, la parte construida de la bóveda (rosca o roscas inferiores) servía de cimbra de las roscas siguientes, manteniendo rigurosas reglas de enjarje y trabazón de la fábrica, dando lugar a ahorros del orden del 70 % en las costosísimas cimbras de esos puentes. Modestamente, atribuía a los romanos el empleo de esta técnica, usada luego también en los arcos de hormigón[6]. Mediante esta técnica no solo se ahorraba en cimbra, sino también en cantería, puesto que únicamente los sillares de la primera rosca habrían de ser de mejor calidad (por resistencia y por estética), pudiendo ser los de las roscas restantes de menor calidad [FIG. 30], pero advirtiendo Séjourné que conviene entonces disponer regularmente unos perpiaños de buena fábrica, para prevenir tanto asientos innecesarios como la aparición de fisuras en los paramentos de intradós y en la boquilla.

Además de la construcción de bóvedas por roscas sucesivas, su diseño de cimbras, con disposición radial desde el «foco» de la curva del intradós [FIG. 31], contribuyó de ma-

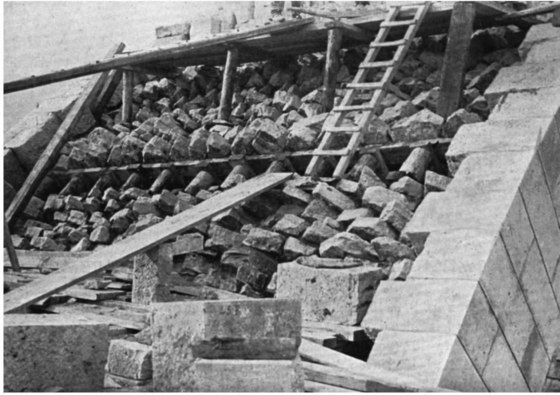


FIG. 30 Trasdós de una de las bóvedas elípticas de 38,5 m de luz del puente de Épinay-sur-Seine (1906), con la ranura para la introducción en el momento oportuno de perpiaños de fábrica de tan buena calidad como la de las boquillas o el intradós. Foto tomada de la pág. 19 del tomo V de SÉJOURNÉ, 1913. En https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Pont_sncf_d%27epinay_-_grand_bras_-_octobre_2015_%283%29.jpg puede verse una imagen reciente del puente en servicio.

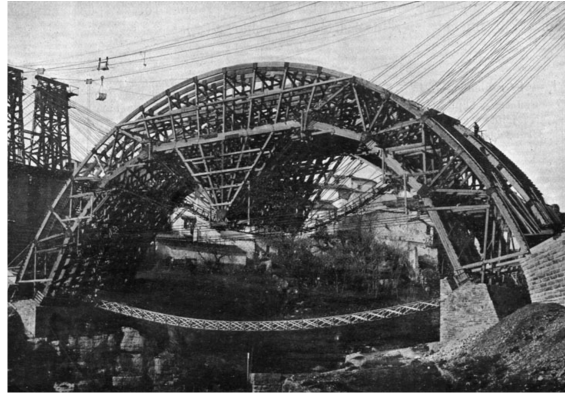


FIG. 31 Cimbra, en madera de castaño, como se preconizaba en Francia desde la época de Perronet, del puente de Sidi-Rached, en Argelia, proyectado (cimbra incluida) por Séjourné en 1912. La foto está tomada de la página 111 del tomo II de su obra (SÉJOURNÉ, 1913). Una foto de 2006 del impresionante viaducto puede verse en http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Sidi_Rached_Bridge

nera igualmente decisiva al abaratamiento de las cimbras. Esto supuso, especialmente en Francia, un periodo adicional de supervivencia de las bóvedas de piedra, mejorando su competitividad económica, en unos años (los primeros del siglo XX) en el que la irrupción del hormigón estructural era ya imparable.

Bóvedas esviadas[7]

El aparejo de las bóvedas no representa una complicación especial en las bóvedas rectas, de directriz ortogonal al eje del puente, pero resulta muy complejo en el caso de bóvedas esviadas, resultado del cruce oblicuo del puente sobre el cauce o vía inferior. Aunque hay soluciones a base de arcos «desfasados» [FIG. 32] que generan un efecto visual intere-

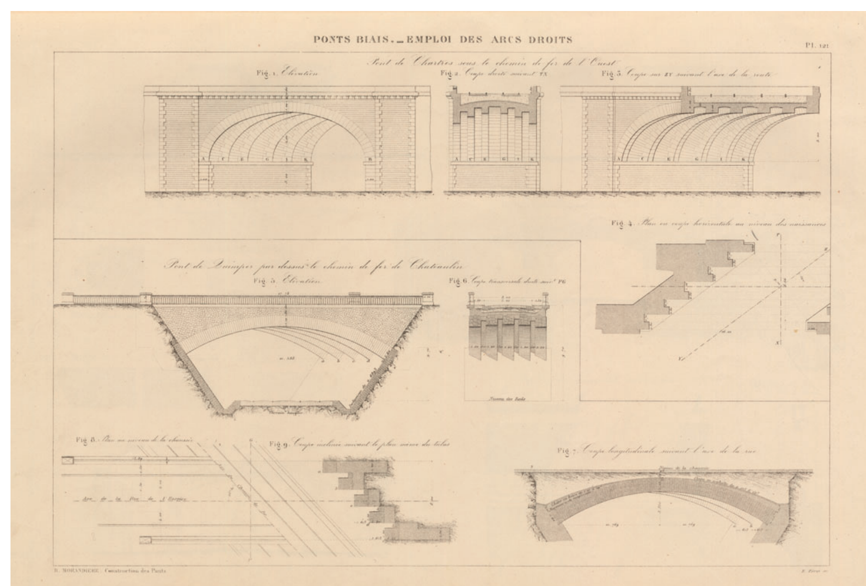
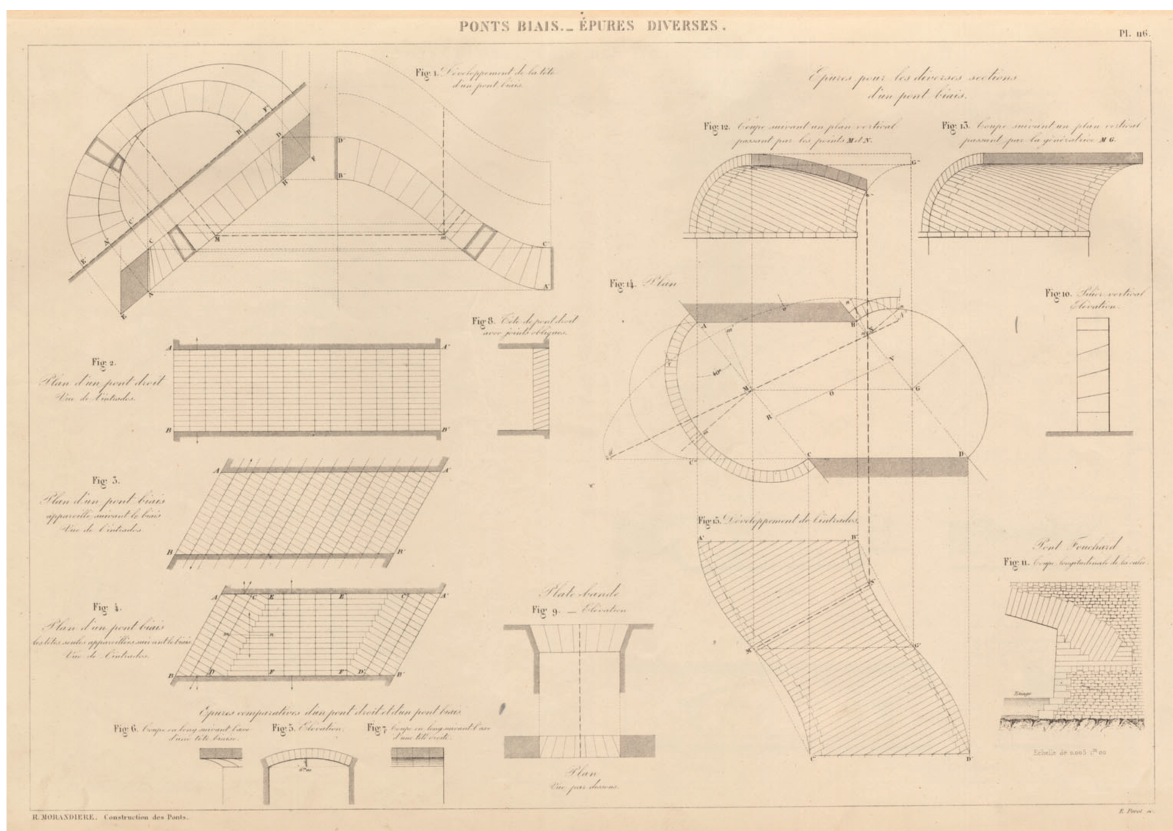


FIG. 32 Lámina 121 de MORANDIÈRE, 1874, que muestra algunos ejemplos de soluciones oblicuas con arcos desfasados.

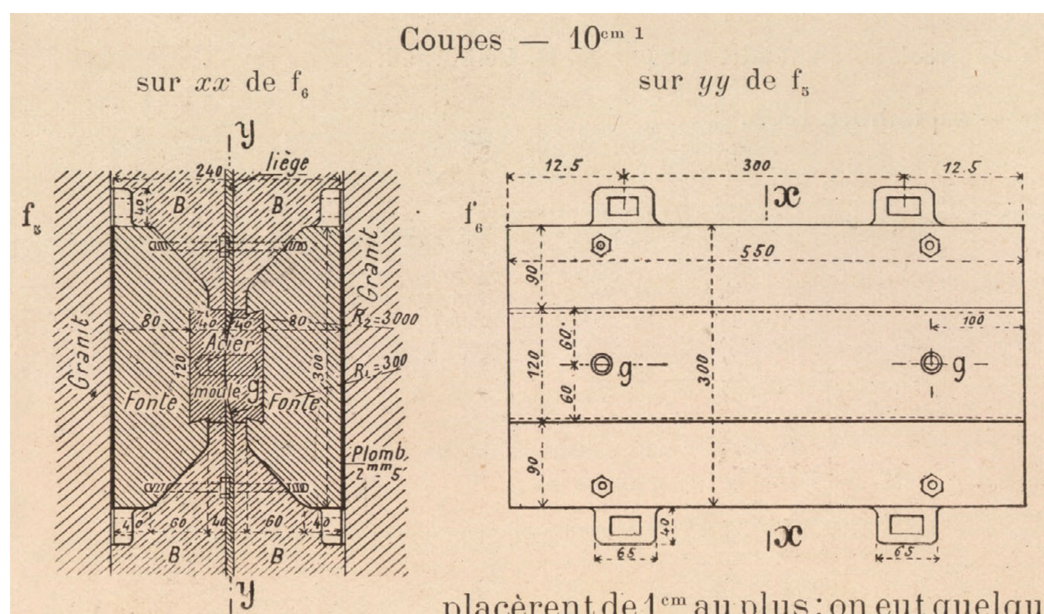




FIGS. 33a y b Lámina 116 de MORANDIÈRE, 1874, que presenta una serie de despieces típicos de bóvedas esviadas.
Abajo, foto propia de una de las bóvedas esviadas del puente ferroviario de la línea Madrid-Hendaya sobre el río Oria en Ordizia (Guipúzcoa).

sante, su ejecución es compleja y su funcionamiento no es exactamente el de bóveda, es decir, tridimensional, sino más bien el de lo que son realmente: arcos independientes, de funcionamiento diferenciado cada uno en su plano, con poca, mala o nula trabazón con sus vecinos. Ni siquiera el relleno del trasdós, que tiende a lixiviarse con el tiempo, asegura a largo plazo la solidaridad entre arcos, como he podido comprobar en los pocos puentes de este tipo que hay en España.

Mejor resultado mecánico y también una apariencia estética muy llamativa dan las bóvedas con aparejo especial, como se muestra en las figuras 33a y b. La razón de ser





FIGS. 34a y b Articulación utilizada por Séjourné (tomo IV de SÉJOURNÉ, 1913). Abajo, detalle de bóveda triarticulada del Reichenbachbrücke (1902-1903), en Múnich (foto propia), de hormigón en masa y prensado, con sillería exterior, en el que se aprecia también cómo el tímpano tiene liberada una junta (en adaraja) para permitir el movimiento que induce la rótula en su giro.

principal de la sofisticada estereotomía de las dovelas que se ofrece al espectador estriba en la necesidad de configurar de forma especial las superficies que delimitan cada dovela «para que el empuje que se produce sobre dichas caras sea absorbido siempre por compresión, y no exista, o al menos esté acotado, el empuje al vacío que puede provocar la inestabilidad»[8], cosa que he podido comprobar yo mismo.

Articulaciones

Otra de las aportaciones de Séjourné, ya en ese periodo final de los puentes de piedra, consistió en disponer articulaciones [FIG. 34a], como venía siendo práctica habitual en los puentes metálicos (se citan ya en Morandière, 1874, para puentes de fundición) y pronto se haría también en los de hormigón, lo que liberaba a los técnicos de la responsabilidad de combatir las aperturas de sillares y fisuras que se producían tras el descimbrado, como se ha indicado ya, y que no siempre aparecían en los lugares deseados. La introducción de articulaciones permitía, por tanto, situar de antemano con toda seguridad la posición



FIG. 35 Juntas de rodadura en bóveda secundaria de puente sobre la desembocadura del río Xallas (A Coruña). Como puede verse, también el giro ha forzado a liberar la junta en adaraja, como en la figura 34b.

de giro, eliminando esos riesgos. El problema asociado a esa ventaja (la felicidad nunca es completa, como recuerda frecuentemente Hugo Corres) es que la junta acaba manifestándose en el tablero, con los conocidos inconvenientes que eso conlleva[9]. Aunque lo más frecuente era disponer rótulas en los puentes arco de tímpanos calados (montantes y arquería superior), también se dispusieron en puentes de tímpano lleno, como se muestra en la figura 34b.

Ribera (Ribera, 1929), siguiendo a Séjourné, da cuenta también de otro tipo de articulación, por rodadura, muy infrecuente. Encontré un detalle de este tipo en una bóveda del puente sobre la desembocadura del río Xallas (A Coruña), como se muestra en la figura 35. Se trata, en este caso particular, de una solución innecesariamente compleja.

ACABADOS

En todos los puentes, pero especialmente en los de carácter monumental por su entorno urbano o su importancia, un equipo de canteros especializados, prácticamente escultores, recorría los paramentos vistos para repasar juntas, remates, molduras, medallones y otros ornamentos. La figura 36 muestra el andamio adosado al paramento del alzado del puente, amarrado al pretil, pero para los trabajos en el intradós de la bóveda se utilizaban andamios convencionales, si se trabajaba en seco, o barcazas sobre las que se disponían dichos módulos de andamio.

Otro aspecto, realmente previo al de los acabados, era el de dotar de conexión visual adecuada a los tímpanos con las bóvedas, de forma que las hiladas de aquellos vinieran a coincidir con un remate adecuado de las piezas de la bóveda en su trasdós, como es el caso de las figuras 9, 13 o 25 de este mismo texto, aunque haya que utilizar la lupa para percatarse, si bien en la gran mayoría de los casos, como en las figuras 34b y 35, se procuraba simplemente un remate digno.

DRENAJE

Desde la Antigüedad se supo que la amenaza para la durabilidad de la obra provenía del agua. Por eso siempre se prestó gran importancia al drenaje. Se trataba de impedir que el agua se acumulase tanto en la plataforma como en los senos de las bóvedas, bien sobre

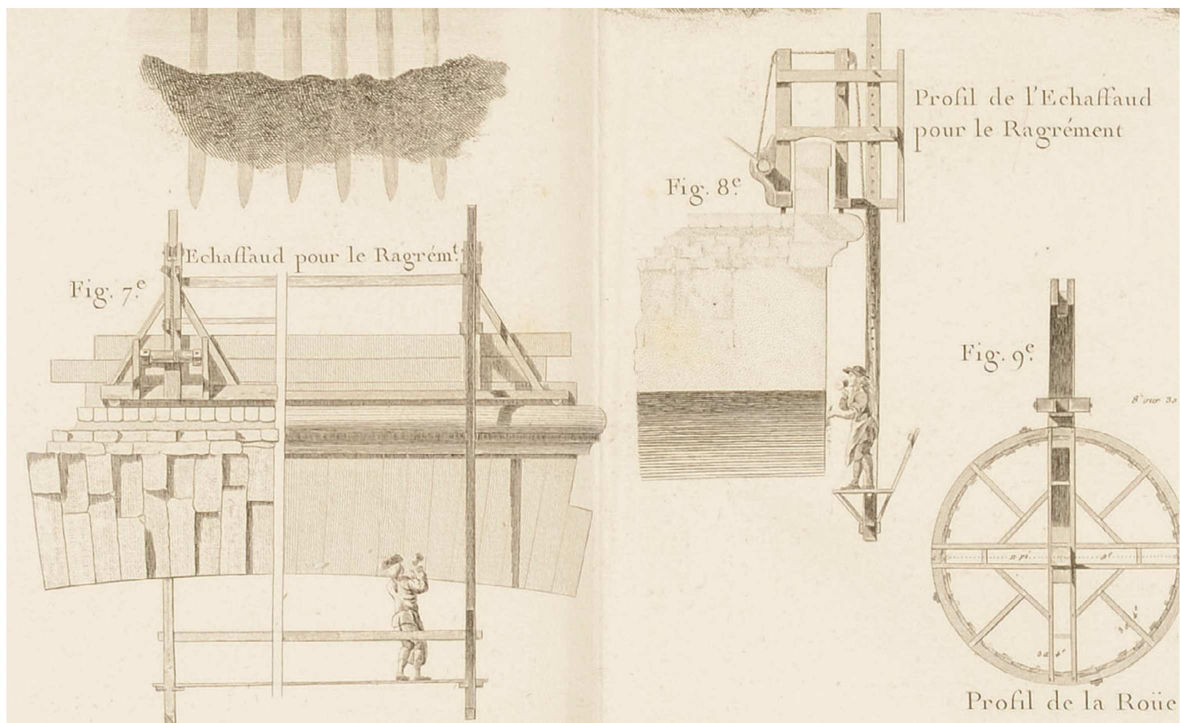


FIG. 36 Lámina XLIV de PERRONET, 1784-1820, que muestra el dispositivo para que los canteros de remates pudiesen tener acceso a los paramentos para regularizar las superficies y dar los acabados correctos, referidos aquí al puente de Orleans.

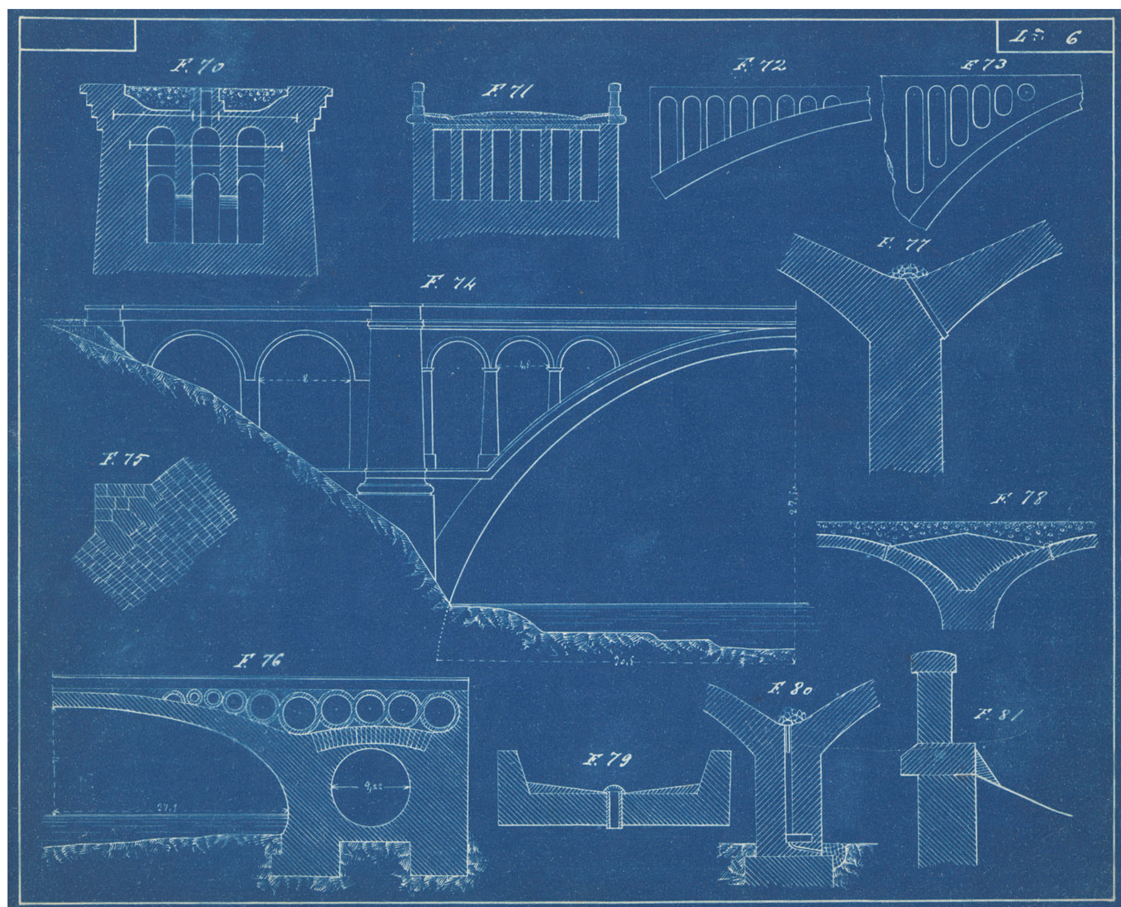


FIG. 37 Lámina VI de GAZTELU, 1910, que muestra, entre otros detalles, diferentes soluciones para el drenaje de los tableros.

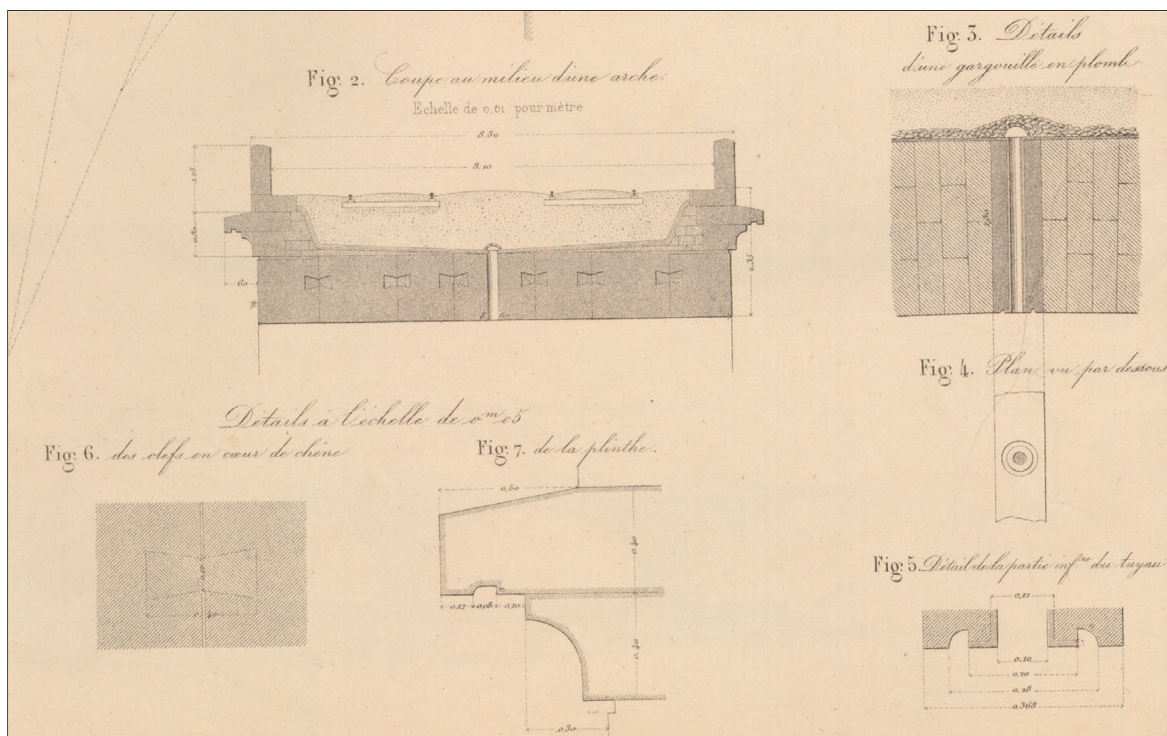


FIG. 38 Lámina 75 de MORANDIÈRE, 1874, que presenta también algunos detalles para el drenaje y para evitar que el agua escurra incontroladamente por los paramentos.

pila, bien sobre estribos. Todos los textos aquí citados mencionan la necesidad de procurar dicho drenaje y facilitan detalles en ese sentido, como los que se recoge en la figura 37, recomendándose las numeradas como 78 y 79 porque alejan las aguas de los puntos más conflictivos. En la figura 38 se dan también detalles del mismo tipo, poniendo asimismo el acento en detalles tan sencillos como disponer goterones. Estos ingenieros eran conscientes de que, construyendo bien y con detalles de este estilo, el mantenimiento se reducía a un mínimo (no a cero, como sabían ya quienes tenían que mantener puentes metálicos).

EPÍLOGO

Unas pocas reflexiones para terminar. De entrada, reconocer la extraordinaria categoría que tenían todos estos artífices como ingenieros y seguramente también como personas, porque no me es posible imaginar a estos colosos profesionales como canallas. Eran muy completos: sabían mucho de matemáticas y, en particular, de geometría, indispensable para trazar las bóvedas y la estereotomía de sus piezas y aparejos; y de hidráulica, de maquinaria, etc. Pero sabían también de geografía, porque la estudiaban y porque pisaban el terreno. También porque eran conscientes de que la obra que construían (una carretera, una línea férrea o un canal) estaba al servicio de una sociedad muy necesitada de la infraestructura, de la cual los puentes son solo eslabones, muy importantes desde luego, pero no fines en sí mismos. Los ingenieros de hoy no tenemos esa visión ni de la

geografía física, ni de la socioeconómica. Estamos ensimismados con las estructuras, que hemos puesto en un primer plano que oculta la verdadera trascendencia de la obra.

Aquellos gigantes fueron ingenieros, especialmente los autores de tratados como los citados, con una extraordinaria capacidad de trabajo, tanto para atender a sus proyectos y obras, como para escribir las Memorias, dibujar los planos con tantísima cantidad de información por unidad de superficie de plano. ¡Y pensar que me ha costado tanto escribir estas líneas! Bien es cierto que he disfrutado, como lo hice con el curso de verano para el que se redactan estas notas, pero no dejo de rendirme ante la colosal tarea que ellos emprendieron de trasvasar el conocimiento adquirido por su propia experiencia, muy enriquecida por la experiencia de otros anteriores o contemporáneos a ellos. Porque leían mucho y estudiaban lo que habían hecho otros, antes de dar luego el paso siguiente, siempre audaz y contenido.

Ya lo he dicho en otro lugar, pero no puedo dejar de repetirlo. De ese estudio nacen a un tiempo el conocimiento (acto racional) y el amor por lo aprendido y desentrañado (acto irracional y emocionante). Ese cariño es el que hoy debe movernos a cuidar de los puentes que han llegado hasta nosotros y difundir sus muchos méritos y utilidades. En ese sentido, en el de la lectura y el estudio, cabe mencionar de manera muy especial la labor de la Biblioteca de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Me atrevo a cerrar estas líneas con la idea de que estas construcciones no son solamente parte de un pasado glorioso de la ingeniería, sino que hay aún recorrido para hacer intervenir la piedra y el ladrillo en la ingeniería estructural del futuro. En un cierto intervalo de luces y funciones, pero aún no han dicho su última palabra.

NOTAS

1. En la figura se muestra como más capaz la curva *casinoide*, en honor de Cassini, astrónomo italiano que murió a comienzos del siglo XVIII y que había propuesto una órbita ovalada, ni circular ni elíptica, para los planetas en torno al Sol. También se aprecia en la figura el gran parecido de la catenaria, de trazo discontinuo, y la parábola. Se trata de una figura muy original que da cuenta del gran conocimiento de la Geometría por parte de Wiebeking.
2. Este grandísimo ingeniero, padre adoptivo de Navier, fue un ilustrado de extraordinaria formación y visión ingenieril, en el sentido moderno del término, que había sido discípulo de Perronet. Su famoso *Traité de la construction des ponts* está en la Biblioteca de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, en la edición de 1843 que revisó y aumentó el propio Navier.
3. Esta afirmación precisa de un matiz importante: los morteros del siglo XIX ya utilizan cemento portland, artificial, que aportan una considerable resistencia a compresión y también a tracción que, aunque de poco fiar, permite explicar *a posteriori* la mayor capacidad resistente a flexión, simple o compuesta, de la fábrica. No es la única diferencia importante que aporta la utilización de morteros de cemento en el siglo XIX frente a los morteros de cal, o aun de cal hidráulica, de las construcciones anteriores, salvo las romanas, como se explica más adelante. En ese sentido se orientan también las líneas a 45º que dibuja Morandière de estabilidad de los «taludes naturales».
4. Para esbelteces *L/c* del orden de 10, valor típico romano. Ese ángulo es tanto más pequeño cuanto mayor es la esbeltez, a igualdad de rugosidad o coeficiente de rozamiento. El rozamiento cae en picado en cuanto se dispone mortero en las juntas, como sucedió en la construcción de puentes después de Roma, por lo que las cimbras se hicieron necesarias para la totalidad de la bóveda.
5. Este hecho, el de la diferente plasticidad instantánea y diferida de los morteros, está detrás también, junto a otras consideraciones constructivas y de labra, de las mayores deformaciones de las catedrales medievales con relación a sus equivalentes románticas (neo-románicas o neo-góticas), a igualdad de los demás parámetros geométricos y configuración estructural. Se menciona este punto también en la tesis de A. Ramos (Ramos, 2015).
6. Eduardo Torroja vino a utilizar una técnica parecida en la construcción del viaducto de Martín Gil, sobre el Esla, en el gran arco de hormigón.

7. Llamada oblicuas en los textos españoles (apuntes de la Escuela de Ingenieros de Caminos) de mediados del siglo XIX.
8. El texto entrecomillado está tomado del magnífico trabajo de Carlos Gordo (Gordo, 1997), profesor ya fallecido de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, documento que debe consultarse para entender este fascinante problema.
9. La introducción de rótulas mecánicas es la expresión de la sofisticación que la ingeniería fue alcanzando, primero en las construcciones metálicas para facilitar tanto su construcción como su cálculo, en un siglo XIX en el que el Análisis Estructural, cada vez más fiable, ya permitía aquilatar más y así dar con estructuras más económicas. Como se señala aquí, las rótulas en las bóvedas de piedra o de hormigón en masa, servían también a propósitos similares y para corregir ciertos defectos constructivos.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILÓ, M. (2013), *Qué significa construir. Claves conceptuales de la ingeniería civil*, Madrid, Abada Editores.

DURÁN FUENTES, M. (2005), *La construcción de puentes romanos en Hispania*, Santiago de Compostela, Xunta de Galicia.

GAUTHEY, E. (1843), *Traité de la construction des ponts*, editado por Navier, Lieja, Leroux Frères Libraires.

GAZTELU, L. (1910), *Resumen de las lecciones de puentes de fábrica y algunas de puentes metálicos explicadas por el profesor Luis Gaztelu*. Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Imp. del Asilo de Húerfanos del S.C. de Jesús.

GAZTELU. L. (1919), *Práctica usual de los cálculos de estabilidad de los puentes. Exposición elemental*. Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Librería Internacional de Adrián Romo.

GORDO MURILLO, C. (1997), *Bóvedas oblicuas en cantería. Sus elementos y morfología como factores determinantes de su uso*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR (2008), *Cimentaciones de fábrica en puentes*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras.

Grupo de Trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR (2014), *Criterios de intervención en puentes de fábrica*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras.

LEÓN, J. y BAUDER, E. (1999), *La construcción de un puente en el siglo XVIII. El puente de Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet / Der Bau einer Brücke im 18. Jahrhundert. Die Brücke von Neuilly, Jean-Rodolphe Perronet*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Fundación Agustín de Betancourt.

LEÓN, J. y ESPEJO, S. (2007), «Load test to collapse on the masonry arch bridge at Urnieta», en *Arch'07, 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal, 12-14 September 2007*, pp. 969-976.

MORANDIÈRE (1874), *Traité de la construction des ponts et viaducs en pierre, en charpente et en métal pour routes, canaux et chemins de fer*, París, Dunod Editeur, Libraire des Corps des Ponts et Chaussées et des Mines.

O'CONNOR, C. (1993), *Roman Bridges*, Cambridge y Nueva York, Cambridge University Press.

PERRONET, J-R. (1820, con edición previa en 1784), *Description des projets et de la construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans, etc.; …* París, Firmin Didot père et fils.

RAMOS, A. (2015), *Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos*. Tesis doctoral. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

RIBERA, J. E. (1929), *Puentes de fábrica y hormigón armado. Tomo III. Anteproyectos y puentes de fábrica*. Accesible digitalmente a través de la página de la Fundación Juanelo Turriano (http://juaneloturriano.oaistore.es/opac/ficha.php?informatico=00000236MO&idpag=1634248922&codopac=OPJUA).

SÉJOURNÉ, P. (1913), *Grandes voûtes*, Bourges, Vve Tardy-Pigelet et fils.

STEINMAN, D. B. y WATSON, S. R. (2001), *Puentes y sus constructores*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

WIEBEKING, CARL FRIEDRICH VON (1811-1814), *Theoretisch-Practische Wasserbaukunst*, Múnich, Joseph Zängl.

Volver al índice

9
Componentes de los puentes de piedra. Morfología e historia

MANUEL DURÁN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
E.I.C. DURÁN, S.L.

INTRODUCCIÓN

Hubo un momento, al principio de la Historia, en que los humanos surgidos del interior del continente africano se pusieron en marcha huyendo de adversidades y peligros hacia territorios deshabitados, enfrentándose a las muchas dificultades que la naturaleza les ponía delante. En sus recorridos tuvieron que cruzar caudalosos ríos en busca del lugar más favorable, saltando al agua, venciendo su miedo. A base de imaginación y atrevimiento usaron algunos materiales flotantes que les aliviaron estas adversas circunstancias, experiencias que posteriormente les fueron útiles para construir sencillas plataformas de paso. Surgieron los primeros «ingenieros» pontífices.

Miles de años después, una vez que se poblaron amplias zonas de la Tierra y las gentes se asentaron en el territorio, surgen las condiciones favorables para que evolucionen y pasen del primer estado de «salvajismo», en el que dependían exclusivamente de la caza, la pesca y la recolección, a uno de «barbarie» –según plantearon el antropólogo Lewis H. Morgan y el economista Friedrich Engels– en el que ya consiguieron aumentar su alimentación con el cultivo de plantas comestibles y la cría de animales. Esta fue la condición imprescindible para la prosperidad y el progreso humano, con un aumento significativo de la población, por eso hay quien considera a los agricultores como sus impulsores. Se establecieron en aldeas permanentes dando paso al último estado, el «civilizado», en el que parte de la población ya no se dedicaba exclusivamente a la provisión de alimentos sino que realizaban otras actividades como el comercio y las manufacturas. Surge una nueva sociedad y economía cuyo progreso se basa en un avance tecnológico de las herramientas, de su fabricación y de los materiales empleados, pues tal y como lo definía Benjamin Franklin el hombre es un «animal que fabrica herramientas».

Las invenciones y los descubrimientos que permitieron avanzar a la Humanidad surgieron de sociedades diferenciadas según donde se ubicasen. Sus carencias las suplieron con los intercambios comerciales de materias primas y mercancías elaboradas, y con la «mancomunión» o difusión de las ideas y los avances alcanzados por otros y que incorporaron a sus conocimientos y actividades, entre ellos la tecnología constructiva.

Un invento que ha resultado decisivo en la historia de la Humanidad ha sido la rueda que, aplicada a los vehículos, revolucionó el transporte y en gran medida contribuyó al nacimiento de los primeras grandes culturas del Oriente Medio, así como de las ciudades en las que se asentaron los poderes políticos y religiosos y donde se comenzó a desarrollar una intensa actividad industrial y comercial. Estas ciudades vieron nacer y evolucionar la Arquitectura como el arte de proyectar y construir edificios, que aportaban a las gentes alojamiento y protección, seguridad tras las murallas, espacios religiosos donde ubicar a sus divinidades, e infraestructuras diversas como las primeras vías de comunicación terrestres.

LOS PUENTES EN LA ANTIGÜEDAD

Parece probable que el primer puente utilizado fuese una viga cruzada sobre el cauce u obstáculo que se desease salvar, si era ancho de madera y de piedra si era más reducido. La madera pesaba menos por lo que podía ser de mayor tamaño y además soportaba esfuerzos de tracción, deformándose pero sin romperse, aunque tenía el inconveniente que era menos duradera. En cambio, si usaban la piedra, las piezas tenían que ser más pequeñas para poder manejarla por su gran peso y también para que resistiese, pues como viga tenía un corto camino de eficacia; en cuanto su luz, superado un determinado umbral no soportaba la tracción generada en el centro o el esfuerzo cortante en las proximidades de los apoyos, y se venía abajo. Con estas premisas y en algunas zonas fluviales de Oriente Medio, cuencas del bajo Tigris y Eufrates, donde escasean la piedra y la buena madera se las tuvieron que ingeniar con los materiales que tenían: arcilla y una vegetación de plantas herbáceas y árboles de madera de baja calidad como la palmera. Con ellos consiguieron una arquitectura de «barro», de adobes y ladrillos, con la que materializaron sus templos, palacios y una buena parte de sus obras públicas.

Para utilizar estos nuevos y limitados materiales de construcción en la cubrición de espacios tuvieron que componérselas ampliando sus técnicas constructivas con los arcos formados por voladizos sucesivos y posteriormente por dovelas dispuestas con una determinada geometría. Estas nuevas tecnologías pasaron al ámbito de las obras públicas, empleándose en canalizaciones, puentes acueductos y probablemente viarios.

El arco de dovelas fue un nuevo y trascendental invento que revolucionó el arte de cubrir espacios ya que con unas pequeñas piezas colocadas de una forma definida se podía realizar una estructura que era estable, resistente y duradera. Se llegó a ella tras numerosos fracasos y nuevos intentos que corregían los modelos anteriores, de un modo natural, con total desconocimiento de las leyes físicas que justifican que una estructura funcione, simplemente aprendiendo a realizarlas de un modo concreto. Como escribe J. E. Gordon (Gordon, 1999) el maestro cantero medieval que construía una catedral



FIG. 1 Puente griego con arcos de voladizos sucesivos en Selinunte, Sicilia. Fotografía de M. Durán, 2016.

justificaba su permanencia «gracias a las manos de Dios», pero sabía que si seguía las reglas aprendidas, no se caería.

La tecnología constructiva del mundo antiguo occidental vino de Egipto a través de los griegos, y más adelante de la construcción romana. Técnicas como la ejecución de fábricas de sillería con juntas en seco bien labradas, el uso de grapas para darle firmeza, el replanteo riguroso de las obras, la fabricación industrial de los materiales, los sistemas de transporte y de elevación de grandes bloques de piedra o de izado de obeliscos, algunos todavía no conocidos, la construcción de carreteras para el paso de grandes cargas, etc., fueron técnicas compartidas por todos ellos. Desde el tercer milenio antes de Cristo se empleó en Egipto la bóveda de voladizos sucesivos y de dovelas, construidos al principio con adobes y ladrillos en cubriciones de edificaciones funcionales y de poca relevancia como tumbas, almacenes y puertas de recintos. Adoptaron formas de tipo parabólico y si inclinaban y apoyaban las primeras roscas de adobes o ladrillos sobre un pesado muro de fondo no necesitaban emplear cimbras al sostenerse las siguientes sobre estas. En el siglo VII a.C. ya se empleaban las dovelas de piedra labrada, como lo atestigua el templo de las Divinas Adoratrices en el *Ramesseum* de Luxor.

Los griegos emplearon el arco en la arquitectura civil y militar de la época helenística, como por ejemplo en el corredor abovedado del estadio de Olimpia o en la puerta de la fortaleza de Oiniadai (Acarniana, Grecia). No se conocen puentes adovelados que hayan sido construidos en esta época clásica; los más antiguos fueron construidos en época imperial romana como el puente sobre el río Sarantapotamos en Eleusis (h. 140 d.C.).

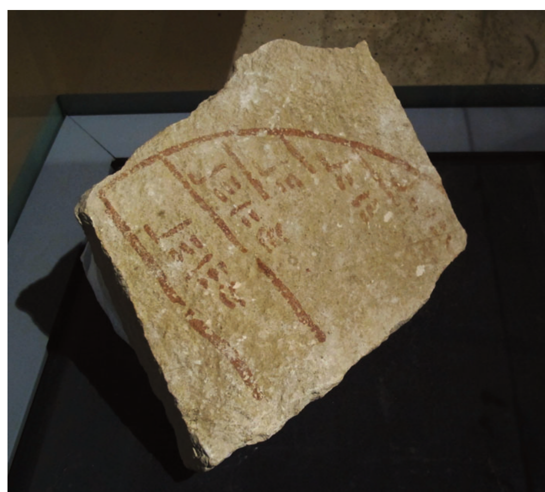


FIG. 2 Ostracón de piedra caliza con las medidas de un arco. Museo de Saqqara, Egipto. Fotografía de M. Durán, 2012.



FIG. 3 Puente acueducto de hormigón en Torre Astura, Italia. Fotografía de M. Durán, 2011.

LOS PUENTES ROMANOS

Si se analizan con cierto detalle los puentes conservados en el antiguo territorio imperial romano se aprecia que muchos de ellos comparten unas características constructivas comunes, que se explicaría si su construcción estuvo sujeta a unas mismas recomendaciones o «normas» técnicas y a unos procesos constructivos similares, establecidos y reglamentados, aprendidos previamente en «escuelas» creadas para tal función. De ellas salían técnicos preparados que eran destinados, en primer lugar, a las obras civiles y militares imperiales. Estos técnicos no abundaban y estaban muy solicitados, como se desprende de la lectura de unas cartas cruzadas entre Trajano y su legado Plinio El Joven, ambos necesitados de sus servicios y que el emperador no le puede enviar a Bitinia pues los pocos de los que disponía estaban «para las obras que se hacen en Roma o en los alrededores».

Las estructuras arqueadas fueron muy empleadas en los puentes romanos con la maestría de quien ha comprendido su correcto funcionamiento estructural, consiguiendo no solo el fin constructivo sino también una indudable calidad estética. Utilizaron mayoritariamente los arcos de medio punto y en menor medida circulares rebajados –por ejemplo en el puente de San Lorenzo en Padua construido hacia el año 50 a.C.– que se ajustan mucho mejor a la curva antifunicular de las cargas permanentes, por lo que su rosca puede tener un menor espesor. Sin embargo tienen el inconveniente de producir un mayor empuje horizontal en los estribos que tendrán que contrarrestar su efecto con un mayor tamaño. Se conservan puentes de época republicana como los puentes Emilio (142 a.C.), Milvius (109 a.C.), Cestius y Fabricius (62 a.C.) en la propia ciudad de Roma. En España los puentes se fueron construyendo según se iba consolidando el dominio romano del territorio. Quizá uno de los primeros puentes de piedra edificados haya sido el Pont del Diable en Martorell (Barcelona) construido para la *vía Augusta* sobre el río Llobregat por el personal militar de las legiones *IV Macedonica*, *VI Victrix* y *X Gemina*, y que se podría datar entre los años 16 y 8 a.C.

La piedra labrada en sillares fue su material por excelencia, aunque no faltaron otros tipos de fábricas de mampostería tomada con mortero de cal, de ladrillo y, excepcionalmente, de hormigón en masa como único material.



FIG. 4 Alcantarilla de Mérida, Badajoz. Fotografía de M. Durán, 2005.

En Mérida se conserva una pequeña alcantarilla de la antigua vía a Lisboa en la que hay una sabia disposición de esos tres materiales básicos –piedra, ladrillo y hormigón– colocados en diferentes partes en función de sus características mecánicas y de su facilidad constructiva. El primer material lo dispusieron en las boquillas de la bóveda por ser más duro y resistente que los ladrillos, con los que aparejaron la parte interior de la rosca. El hormigón lo utilizaron para formar la pieza clave, ya que su plasticidad en fresco les permitió ajustarlo al hueco entre los ladrillos y les evitó hacer una pieza especial de piedra o colocar ladrillos acuñados.

En general se aprecia una gran calidad constructiva y precisión geométrica en las fábricas de los puentes conservados, por ejemplo en el de Mérida sobre el río Guadiana o en el romano de Lugo, en los que los salmeres de las boquillas de algunos arcos todavía están situados exactamente en las marcas de replanteo en L grabadas en las esquinas de la pila. Un caso paradigmático de la precisión constructiva es la *Ponte Velha de Vila Formosa* en Portugal, con seis bóvedas perfectamente semicirculares de unos 10 metros de luz, tres de ellas con sus centros situados a la misma cota en milímetros; la máxima diferencia entre ellos es de 11 cm. Estos valores fueron obtenidos en un levantamiento topográfico realizado con un aparato láser en 1996 (Durán, 1996). Lo paradójico es que se haya conservado en estas condiciones tras dos mil años soportando las avenidas del río Seda, el terremoto de Lisboa de 1755, cuyo epicentro estuvo a escasos 150 km del puente, y las sobrecargas del tráfico de automóviles que tuvo hasta hace unos pocos años.



FIG. 5 *Ponte Velha de Vila Formosa*, Portugal. Fotografía de M. Durán, 2012.





FIG. 6 Doble rosca interior de las bóvedas del puente romano de Freixo, Ourense. Fotografía de M. Durán, 1988.

Son destacables varias técnicas empleadas en esta fructífera época de la historia de los puentes, como por ejemplo los sistemas constructivos que les permitieron incrementar la estabilidad de las bóvedas ante distintas situaciones de sobrecargas o movimientos diferenciales que podrían producirse. Desde mediados del siglo XIX se conoce y maneja el concepto de línea de empuje producida por una determinada sobrecarga, que ha permitido a los técnicos determinar la estabilidad de un arco siempre que pase por el interior de su rosca. La seguridad se incrementa si se maciza el interior de los tímpanos hasta los riñones, o si se aumenta el espesor de la rosca en su tercio inferior. Pues bien, estas técnicas constructivas ya fueron empleadas por los ingenieros romanos, que habían aprendido, gracias a las experiencias acumuladas, sus buenos resultados.

La firmeza o trabazón de la fábrica de sillería la consiguieron con diversos métodos a cada cual más eficaz. La buena labra de los lechos y contralechos de los sillares para que el contacto entre ellos, realizado siempre en seco, fuese el más íntimo posible, la combinaron, en muchas ocasiones, con hiladas de piezas colocadas a soga alternadas con otras colocadas a tizón. En las zonas que consideraron más sensibles a movimientos diferenciales como los tajamares, las cimentaciones o la parte baja de las cepas, trabaron los sillares entre sí con grapas de hierro en forma de U o piezas de madera o plomo con forma de doble cola de milano.

Los puentes romanos fueron levantados para el servicio de las vías extendidas por todo el territorio del Imperio, y al tratarse de auténticas «carreteras» en el sentido actual del término, su diseño tuvo que ir en concordancia. Las vías tuvieron un estudiado trazado por los corredores más adecuados y en derechura, sus pendientes reducidas, generalmente con una anchura importante de unos 6,00 m o más, y con un paquete de firme, el *agger*, de gran calidad, formado por varias capas compactadas de material pétreo y granular, y la amplitud de su calzada. Para acomodar los puentes a estas características también tenían una amplitud superior a los 5,00 m, y una rasante horizontal o con una ligera doble pendiente. En cuanto a su composición formal, si son largos abundan los que la tienen simétrica, con arcos de luces iguales o muy parecidas, o con aberturas crecientes desde las márgenes al centro.

En otras culturas de Oriente como la India el material más empleado en los puentes fue la madera y menos la piedra y el ladrillo. Los modelos más antiguos tenían dos tipos de pilas, unas formadas por pilares delgados sobre los que se apoyaba un dintel alargado en sentido transversal, todo de piedra, y otras construidas con sillería maciza. En ellas se apoyaban las losas de piedra que salvaban los reducidos vanos, aunque en ocasiones era incrementada su abertura con piezas en voladizos sucesivos. En los puentes de arcos, generalmente construidos en tiempos de la ocupación mongol, se empleó el ladrillo en las



FIG. 7 Puente iraní de «los treinta y tres arcos» (Sio Seh Pol) en Isfahan. Fotografía de M. Durán, 2008.

zonas donde escaseaba la piedra, como la región de Dhaka, y en otras, el granito o el gneis. Los arcos tenían una forma parecida a la canopial, con un apuntamiento acusado en la clave, quizá utilizado por influencia de la construcción árabe o iraní [FIG. 7]. Lo más curioso de estas estructuras era la cimentación, formada por pozos de fábrica rellenos de piedra dispuestos regularmente, que en los suelos muy blandos de las orillas de los ríos funcionaban mejor que los pilotes de madera. Los arcos se construían probablemente uno a uno, si se consideran los grandes espesores de las pilas similares a las aberturas, como por ejemplo en el puente de Narvar, con luces de 6,00 m y espesores de pilas de 5,90 m. Esta disposición formal le daba a los puentes una limitada capacidad de desagüe, por lo que solo podrían evitar su destrucción si las grandes avenidas se abrían paso por sus extremos. En cuanto a la rasante de sus plataformas era muy habitual que fuese de ligero lomo de asno.

En China, algunos de sus puentes son singulares por su tamaño si los comparamos con los occidentales. Por poner un ejemplo, el puente de piedra adintelado llamado Wan-Shou sobre el río Min Chiang (siglo XIII) tiene losas que alcanzan los 45 pies de longitud (13,72 m), con un peso aproximado de 80 toneladas. Su longitud es de 2.050 pies con 36 vanos. La ciudad de Cheng-du en la provincia de Szechwán estaba atravesada por el río Amarillo y para cruzarlo se había construido un puente de piedra que, según Marco Polo (1254-1324), tenía «ocho pasos de ancho y media milla de largo… que está totalmente cubierto de un extremo a otro, por una bellísima cobertura de madera toda pintada de hermosas pinturas de color rojo y, encima, recubierta de tejas».

Los constructores chinos realizaron los puentes con bóvedas arqueadas de medio punto, apuntadas o circulares rebajadas. Su ejecución era similar a las obras romanas aunque las formas de colocar las dovelas eran más variadas. La sillería estaba aparejada con mortero, trabadas sus piezas entre sí con grapas de hierro con forma de S o piezas de unión con forma de doble cola de milano.



FIG. 8 Puente Anji en Zhaozhou, China, del ingeniero Li Chun. Fotografía de Zhao 1974. © Creative Commons.

Hay puentes chinos cuya composición nos llama mucho la atención porque son de una tipología que antecedió bastantes siglos al similar que surgió en Occidente en el XIX. Como paradigma destaca el puente Anji sobre el Xiao Shui construido por el ingeniero Li Chun en el año 610 d.C. Su bóveda rebajada tiene una luz de 123 pies (37,45 m) y una flecha de 23,7 pies (7,22 m) –1/5,19 de relación flecha/luz– con sus tímpanos perforados con dos pequeños arcos también segmentales.

Se podría apreciar que hay un curioso paralelismo de las técnicas constructivas de puentes en China y en Roma, pero no se puede pensar en una posible transferencia tecnológica llegada con las relaciones comerciales que sí hubo entre las dos culturas. Según el ingeniero Fugl-Meyer (Fugl-Meyer, 1937) hay una notable diferencia entre las macizas fábricas de las bóvedas y cepas de los puentes romanos y las delgadas roscas de las bóvedas chinas, cargadas con un relleno de materiales sueltos contenido entre los tímpanos de piedra y coronado por un enlosado.

LOS PUENTES DESPUÉS DE ROMA

Las antiguas obras de fábrica fueron concebidas y ejecutadas con conocimientos, procedimientos y materiales que fueron fruto de unas épocas y que hoy son prácticamente desconocidos para una mayoría de los ingenieros civiles y arquitectos. La comprensión de su funcionamiento estructural sigue siendo abordable con limitaciones para crear modelos numéricos que lo reproduzcan y hay que contentarse con una aproximación al conocimiento de unos determinados niveles de estabilidad –único criterio estructural que ha de satisfacer este tipo de estructura–, con los cálculos grafo-estáticos del siglo XIX o, desde mediados del pasado siglo XX, con los procedimientos de análisis límite propuestos por el profesor Jacques Heyman.

La ingeniería romana ha construido puentes de una gran calidad que los ha convertido en un paradigma de obra firme, resistente y sobria en detalles ornamentales. Esta realidad constructiva fue cambiando a medida que la administración romana fue abandonando los territorios bajo su control centralizado, dejando paso a otra ejercida por artífices que interpretaron a su modo los conocimientos transmitidos y los que podían aprender de la observación de las obras antiguas. Surgió una nueva forma de construir que era resultado de las nuevas circunstancias históricas en la que habían desaparecido muchas de las anteriores condiciones, sobre todo de ausencia de un poder centralizado, de una financiación más escasa en número y reducida en importes y con una manera distinta de transmitir los conocimientos por los maestros de obras medievales, herederos de los arquitectos romanos, a círculos familiares o de gente muy vinculada.

Los grandes puentes de fábrica antiguos que se conservan en nuestras ciudades, como el San Martín en Toledo, la *Ponte Vella* en Ourense y otros muchos, nos siguen impresionando, cuanto más en las épocas de su construcción. En aquellos más o menos lejanos tiempos las personas pasaban de la impresión y asombro al agradecimiento ya que les permitía un cruce del río seguro fuera del alcance de las intimidantes aguas, sobre todo cuando estaban crecidas. Desde antiguo las bóvedas de los puentes fueron un enigma de funcionamiento para todos los que los cruzaban, misterio que resolvían atribuyendo su construcción a manos diabólicas a cambio de almas cándidas.

El puente siempre ha sido percibido como una obra útil que debía mantenerse en buenas condiciones para asegurar el paso. Su ruina causaba grandes trastornos y pesares a los usuarios, pues solo quedaba como alternativa la realización de grandes rodeos –no abundaban los puentes– o el paso mediante barcas que había a pie de puente. Estas embarcaciones eran endebles y surcaban el río atiborradas de personas, mercancías y animales. Durante las crecidas invernales estas operaciones se volvían muy arriesgadas pues si los animales se asustaban era muy probable que la barca zozobrase y se ahogasen los pasajeros. Para no pasar por estas peligrosas situaciones hubo quien en la Edad Media procuró dejar sueldos y dineros en sus mandas testamentarias para el mantenimiento de la fábrica y los posibles reparos.

Las peores condiciones de la Edad Media con respecto a la anterior no influyeron, desde el punto de vista de la construcción de puentes, ni en la cantidad ni en la menor calidad estructural, aunque así lo parezca, pues los maestros aprendieron a gestionar los reducidos recursos con mayor habilidad y aprovechamiento. Así pasaron de las formas circulares de las macizas bóvedas romanas a las formas apuntadas que, como les indicaban las reglas geométricas de Nicolas-François Blondel o de Rodrigo Gil de Hontañón, podían construir con unos estribos más ligeros. La buena piedra de sillería solo la colocaban en las boquillas, mientras que la de menor calidad se ponía en el interior de las bóvedas. Esta técnica ya la emplearon los romanos, por ejemplo en los puentes *Milvius* y *Fabricius*, con boquillas de duro travertino y el interior con piedra de tufa.

Estas bóvedas, que parecen más débiles que las romanas, han funcionado bien a pesar de las deformaciones que se observan en muchas de ellas, como el «aplanamiento» entre los riñones y la clave –modo de deformarse los arcos apuntados con levantamiento de la clave– o el «abombamiento» de los muros y tímpanos. Se han movido y articulado pero han alcanzado un estado de equilibrio que les ha proporcionado un correcto funciona-



FIG. 9 Alzado aguas abajo del puente romano-medieval de Navea, Ourense. Fotografía de M. Durán, 2003.

miento estructural y, por consiguiente, su permanencia. Otro logro técnico, en comparación con las obras romanas, fue el afinamiento de los espesores de las bóvedas, de los tímpanos y de los muros de acompañamiento. Lo pudieron hacer gracias a la reducción de los empujes del relleno por su reducida anchura –muchos no superan los 4,00 m– y a una ejecución que alternaba capas de piedras irregulares y de tierra. Estas últimas permitían la nivelación del relleno y su compactación manual, así como asentar mejor la siguiente hilada de piedras.

Si se analiza la estabilidad de las bóvedas de algunos puentes medievales con los procedimientos de análisis límite, se vería que no podríamos hallar una situación de equilibrio con un mínimo margen de seguridad. Esto ocurre, por ejemplo, con la bóveda medieval del puente de Navea (Ourense) con una forma apuntada de 18,00 m de luz y 9 m de flecha, en el que si se calcula su estabilidad considerando solo las cargas muertas y con los espesores reales de la parte interior de su rosca (bastante menor al de boquillas), no se logra hallar una línea de empujes que pase por su interior. Esto significa que, en teoría, el arco debería estar en el suelo y si no lo está quizá se deba a la rigidez de los paramentos verticales de los alzados y su conexión con los aristones de la bóveda.

La distribución de aberturas con luces crecientes hacia el centro del río de las obras de paso medievales y el deseo de abarcar el cauce de aguas normales con un único arco apuntado, dio lugar a las rasantes de doble pendiente, en ocasiones en pronunciado «lomo de asno».

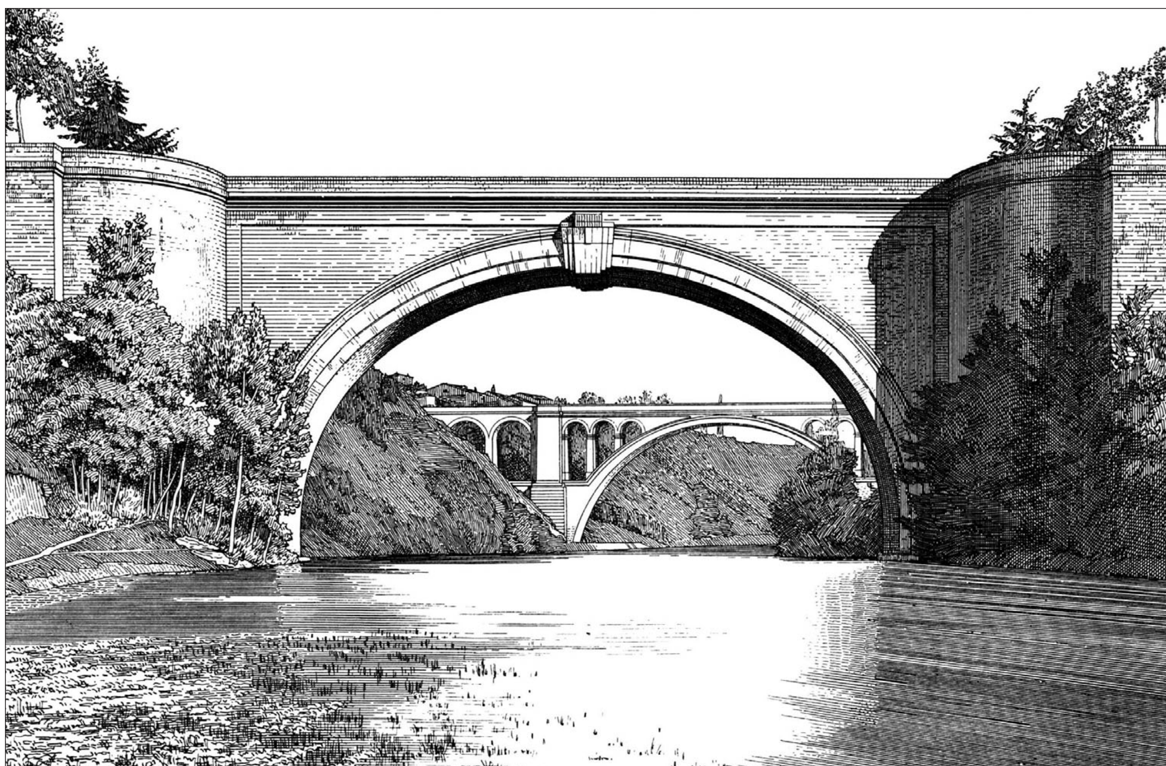


FIG. 10 Alzados de los dos puentes de Lavaur, en primer plano el de J.-M. SAGET (siglo XVIII) y al fondo el de P. SÉJOURNÉ (siglo XIX), grabado de Dartein, en PRADE, 1988.

Durante la Edad Moderna hasta finales del siglo XVIII en España los puentes se siguen construyendo a la manera «romana», quizá porque sigue en manos de maestros y alarifes y no de los ingenieros o arquitectos, con mayores estudios y conocimiento de las tendencias europeas, sobre todo de Francia e Italia. En estos países surgen, a partir del siglo XIV, novedades constructivas que les permiten desarrollar nuevas tipologías con arcos de directrices rebajadas circulares y de varios centros, que supusieron un gran avance hacia la antifunicularidad de las bóvedas. Los materiales siguen siendo los tradicionales, la piedra y el ladrillo.

En el siglo XIX los puentes de piedra alcanzan su plenitud pues son muy empleados en la construcción de las redes ferroviarias y de carreteras, aunque cada vez son más abundantes los construidos con los nuevos materiales, el hierro primero y el acero después, y el hormigón armado. El último gran constructor de puentes de piedra fue el ingeniero francés Paul Séjourné en cuya obra magna *Grandes voûtes* (1914) recogió toda la tecnología que había en su época sobre el proyecto y la ejecución de un puente de fábrica.

BIBLIOGRAFÍA

ADAM, J. P. (1982), *L'architecture militaire grecque*, París, Picard.

BESENVAL, R. (1984), *Technologie de la voûte dans l'Oriente Ancien*, dos tomos, París, Editions Recherche sur les Civilisations.

DEGRAND, E. (1888). *Ponts en maçonnerie*, París, Baudry et Cie.

DELOCHE, J. (1973), *Les ponts anciens de l'Inde*, París, École Française d'Extreme-Orient.

DURÁN FUENTES, M. (1996), «Puentes romanos peninsulares: Tipología y construcción», en *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (Madrid 19-21 septiembre 1996), Instituto Juan de Herrera-CEHOPU.

DURÁN FUENTES, M. (2005), *La construcción de puentes romanos en Hispania*, Santiago de Compostela, Xunta de Galicia.

DURÁN FUENTES, M. (2006), «Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos», en *Actas del III Congreso: las obras públicas romanas en Hispania* (Astorga, 5-7 octubre 2006), Junta de Castilla y León, Consejería de Cultura y Turismo.

FERNÁNDEZ CASADO, C. (1980), *Historia del puente en España. Puentes Romanos*, Madrid, Instituto Eduardo Torroja.

FUGL-MEYER, H. (1937), *Chinese Bridges*, Shanghai, Hong-Kong, Singapur, Kelly and Walsh Limited.

GALLIAZZO, V. (1994-1995), *I ponti romani*, 2 vols., Venecia, Edizioni Canova.

GORDON, J. E. (1999), *Estructuras o por qué las cosas no se caen,* Madrid, Celeste Ediciones.

HEYMAN, J. (1995), *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*, Madrid, Instituto Juan de Herrera y E.T.S. de Arquitectura.

HUERTA FERNÁNDEZ, S. (2000), «Estática y geometría: el proyecto de puentes de fábrica en los siglos XV al XVII», en *Actas III Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (Sevilla 26-28 octubre 2000), Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla.

MESQUI, J. (1986), *Le pont en France avant le temps des ingénieurs*, París, Picard.

NEEDHAM, J. (1971), *Science and Civilisation in China*, vol. IV. 3, Cambridge, Cambridge University Press.

PRADE, M. (1986), *Les ponts, monuments historiques*, Poitiers, Lib. Brissaud.

PRADE, M. (1988), *Ponts et viaducs au XIXe siècle,* Poitiers, Lib. Brissaud.

PRADE, M. (1990), *Ponts et viaducs remarquables d'Europe*, Poitiers, Lib. Brissaud.

SÉJOURNÉ, P. (1913-1916), *Grandes voûtes*, Bourges, Veuve Tardy-Pigelet et fils.

STEINMAN, D. B. y WATSON, S. R. (1979), *Puentes y sus constructores*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos-Ediciones Turner.

VILLALBA, C. (1994), «Puentes: Arcos de fábrica», *Publicaciones de la Asociación de Ingenieros de Caminos, C. y P*.

Volver al índice

10

Criterios de análisis y comprobación de estructuras de fábrica

Visión histórica, planteamiento actual y evolución futura

LEONARDO TODISCO
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETSICCP. UPM

JAVIER LEÓN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Titular de la ETSICCP. UPM

LA FÁBRICA: EVIDENCIAS FÍSICAS DE SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Antes de establecer cualquier criterio de análisis para las estructuras de fábrica, entre las que, obviamente, se encuentran los puentes de piedra o ladrillo, se muestran algunas evidencias físicas de su comportamiento mecánico que pueden guiar al técnico en la definición del enfoque a adoptar de forma más adecuada.

La fábrica, definida como «la construcción o parte de ella realizada con materiales tales como piedras, ladrillos, bloques, tierra, adobe, tapial y hormigón en masa» (Bauder y León, 2003), es un material que generalmente presenta, sin resultar evidente, una enorme heterogeneidad y, en general, una importante anisotropía. Así, la figura 1 muestra dos *pagghiare*, construcciones de fábrica comunes en la región italiana de Apulia (Todisco y Sanitate, 2016), donde se aprecia una estructura exterior bastante ordenada que deja presagiar algo similar en el interior. En la figura 2 vemos una construcción similar a las de la figura 1 después del colapso de la bóveda: aunque externamente la estructura parece



FIG. 1 *Pagghiare* en Apulia, Italia.



FIG. 2 *Pagghiara* collapsada en Apulia, Italia.



FIG. 3 Mecanismo de colapso cinemático en arcos o bóvedas. Ensayo de laboratorio. RAMOS, 2015, ETSICCP, Madrid.

tener un cierto orden, internamente presenta una extrema heterogeneidad. Esta característica no es algo peculiar de las *pagghiare* y se puede hacer extensiva a la mayoría de las estructuras de fábrica.

Cabe decir, desde el punto de vista de la capacidad resistente, que la fábrica manifiesta su modo de trabajar a través de grietas y fisuras (Huerta, 2005). Estas manifiestan una nueva forma de equilibrio tras la variación de las condiciones de contorno (descimbrado, movimientos de pilares, variación de cargas, acciones físicas y químicas, fenómenos reológicos, etc…). La mayoría de las grietas se generan justo después del descimbrado, cuando el arco, la bóveda o la cúpula, tras el acomodamiento de sus juntas, empiezan a trabajar como tales. Los estribos no son elementos infinitamente rígidos y una rotación de los mismos lleva también a un reajuste de arcos, bóvedas o cúpulas, lo cual es causa de nuevas fisuras, casi siempre en coincidencia con las juntas, en estos elementos. Las grietas no suponen, casi nunca, una disminución de capacidad resistente y no ponen en peligro la estabilidad de toda la estructura. A lo que hay que prestar atención es a la evolución de las fisuras a lo largo del tiempo.

Las experiencias de los colapsos de las estructuras de fábrica enseñan que los modos de fallo más comunes son:

- Formación de mecanismos cinemáticos de bóvedas/arcos (monoarco o multiarco, con posible implicación de las pilas) [FIG. 3]. La situación de mecanismo inestable se alcanza cuando aparece un número suficiente de rótulas que hace perder el equilibrio de todas o de algunas de las partes de la estructura. Esto puede pasar tanto por la acción de sobrecargas como por movimientos impuestos en la cimentación, como asientos, desplazamientos horizontales, etc.
- Agotamiento estructural de los materiales debido a una excesiva compresión del material. Se trata de un modo de fallo bastante raro considerando que el nivel tensional de trabajo es bajo. No obstante, en el caso de cargas concentradas o aplicadas muy al borde de la estructura [FIG. 4], o de materiales de muy baja cali-



FIG. 4 Hendimiento de la parte superior del fuste de una columna de un edificio en Oporto.

dad, la rotura frágil de la fábrica podría generar el colapso total o parcial de la estructura. También se puede producir el fallo del material como consecuencia del *cansancio*, fenómeno vinculado a la fluencia no lineal de los morteros, que en el caso de obras de fábrica se puede iniciar a partir de tensiones permanentes del orden del 50 % de las instantáneas de compresión. Fue el caso, por ejemplo, del colapso de la Torre Cívica de Pavía, Italia, en 1989.



FIG. 5 Puente de San Fernando, Madrid.

- Deslizamiento entre dovelas. Se trata de un fenómeno bastante raro que se puede generar o al descimbrar o cuando hay una descompresión de las piezas. Este fallo ha sido detectado, por ejemplo, en el puente de San Fernando en Madrid [FIG. 5].
- Otros modos de fallo menores, desde el punto de vista estructural, y menos frecuentes son el vuelco o el desplazamiento de tímpanos, o la separación de hojas por rasante, no tan rara en puentes de fábrica de ladrillo de directriz rebajada.
- No puede olvidarse el fallo asociado a un fallo parcial o general de la cimentación como consecuencia de movimientos de la cimentación o de la desaparición de esta por socavación, situación frecuente en el caso de los puentes.

Desde el punto de vista del análisis estructural, cabe decir que, en la segunda mitad del siglo XIX, diferentes autores (Kurrer, 2008) propusieron la aplicación de la teoría elástica a las estructuras de fábrica, de manera que se pudiese obtener una solución única a un problema a cuya complejidad contribuye el carácter masivo y aparentemente monolítico de estas construcciones. Esto invita a pensar que se trata de estructuras muy hiperestáticas y que, en el siglo XXI, se pueden analizar de manera solvente con las potentes herramientas de cálculo basadas en elementos finitos y equipadas con pre-procesadores y post-procesadores muy interactivos que hacen muy visual y hasta verosímil el resultado que generan. Sin embargo, y sin ánimo de criticar tales herramientas sino más bien las hipótesis de partida y sus circunstancias, cabe tener en cuenta que:

- Las fábricas no son isótropas, sino marcadamente anisótropas, como se evidencia en las ya citadas grietas y fisuras, que reflejan la débil resistencia a tracción de los morteros en especial, y también de las piezas (piedra o ladrillo) si se compara con la resistencia a compresión.
- Las fábricas no tienen un comportamiento lineal, principalmente para estados más avanzados de carga, que importan poco dado el, por lo general, reducido valor de las tensiones en servicio, pero es que tampoco son uniformes los módulos de deformación de unas zonas a otras (hojas exteriores, rellenos interiores, zonas con juntas de mayor espesor frente a zonas de espesor menor de junta).

- En la misma línea, los morteros pasaron, antes de fraguar (proceso que pudo durar muchas décadas en el caso de los morteros de cal), por una fase plástica y viscosa, aspecto que no se puede modelizar fácilmente, como tampoco se puede modelizar, por imposible, la historia constructiva real. Incluso después del fraguado, el comportamiento reológico de los morteros hace que, como la citada plasticidad inicial (y larga) de las fábricas, se altere la geometría, de forma que el comportamiento sea no lineal geométrico.
- Estas estructuras dejan, al fisurarse, de ser medios continuos, en un proceso que depende del nivel de carga y en el que participa la interacción con el terreno, para adoptar una configuración, tras la fisuración y el citado reacomodo, diferente de la original.
- Aceptando incluso que, al menos en servicio, el nivel tensional es pequeño, la caracterización de las tan apreciadas propiedades mecánicas (módulo de deformación longitudinal, de Poisson, etc.) es difícil por la gran heterogeneidad de piezas y morteros y por la propia dificultad de los ensayos.
- Asimismo hay que tener en cuenta la escasez de datos geométricos disponibles (eventuales desplomes, espesores, alturas de relleno, etc...), enjarjes, existencia de piezas de cosido o perpiaños y un sinfín de detalles.
- Por si fuera poco, deben considerarse las vicisitudes por las que ha pasado una estructura de fábrica en su larga vida, en una sucesión de demoliciones y refacciones de muy difícil interpretación en clave estructural porque, como ya se ha dicho, no es posible trasponer su evolución a un modelo estructural fidedigno.

La conclusión que debe extraerse de lo dicho es que las herramientas habituales para el proyecto y la comprobación de estructuras modernas de hormigón o de acero no sirven para pronunciarse acerca del nivel de seguridad de las construcciones de piedra o ladrillo. Por tanto, es necesario afrontar el reto de la evaluación de estas estructuras con planteamientos y modelos diferentes y, paradójicamente, tanto más sencillos, simples incluso, cuanto más complejo es el problema, estrategia que siempre ha dado buenos resultados a los ingenieros.

Cabe plantearse, con carácter previo incluso, por qué es necesario abordar el análisis de este tipo de construcciones si llevan en pie tanto tiempo y han dado muestras, a pesar de sus achaques, de capacidad sobrada para resistir las acciones de su propia masa, de los movimientos del terreno, de la violencia del sismo, del paso del tiempo y consiguiente degradación de los materiales, y también de la estupidez humana (guerras y vandalismo) o de su torpeza (restauraciones no siempre acertadas y, lo que casi es peor, no siempre visibles). La respuesta está implícita en la propia declaración anterior y en las observaciones planteadas más arriba, y se expresa elocuentemente en forma de colapsos súbitos y en otros más dúctiles y nobles, pero no menos devastadores. Si en las estructuras modernas el planteamiento ha de ser el de garantizar que la probabilidad de fallo (riesgo para las personas y las cosas) sea suficientemente baja, no hay razón alguna para eludir dicho planteamiento para el caso de estructuras antiguas. Con mesura, proporción, sin ensimismamiento, con buen juicio y grandes dosis de prudencia.

El objetivo de este texto es proporcionar al lector ajeno al análisis de las estructuras de fábrica, unas bases para empezar a plantear el estudio de dichas estructuras, conside-

rando de manera apropiada el material fábrica, con sus heterogeneidades, sus características mecánicas, y sus modos de fallos más frecuentes. No se recogen los métodos clásicos de proyecto (reglas de dimensionamiento o criterios geométricos), ni se describen métodos de análisis más complejos, que inevitablemente demandan un mayor conocimiento de la estructura a estudiar y, por otro lado, no siempre proporcionan unos resultados más aproximados a la realidad. Para empezar, y esto constituye toda una declaración de intenciones, debe recordarse que el modo de fallo más frecuente de las estructuras de fábrica es la inestabilidad, asociada a una falta de equilibrio. Considerado que la estabilidad de la estructura está relacionada con su forma, el problema a resolver en primer lugar es geométrico y la comprobación a efectuar consiste en asegurar que la estructura esté en equilibrio con las cargas exteriores.

PLANTEAMIENTO HISTÓRICO: EL ENFOQUE DEL EQUILIBRIO

Hasta el siglo XV la utilización de formas idóneas para el empleo eficiente de los materiales disponibles, fundamentalmente para su trabajo en compresión o tracción, se basaba en la aceptación empírica del buen comportamiento estructural, sin mediar, que se tenga constancia, explicación racional del mecanismo resistente. Uno de los primeros intentos de entender el funcionamiento de las estructuras de fábrica, más allá del basado en reglas geométricas, se debe a Villard de Honnecourt (Honnecourt, siglo XIII), que anticipó el concepto newtoniano de *Actio = Reactio* mediante la analogía empírica de dos luchadores [FIG. 6] cuyo equilibrio requiere de empujes mutuos.

A partir del siglo XV aparecen los primeros documentos que dan fe de una progresiva profundización en la comprensión del comportamiento estructural de arcos: la evidencia experimental empezaba a acompañar a la aproximación teórica. Una de las contribuciones más relevantes fue la de Robert Hooke (1635-1703), quien, atendiendo a una cuestión de la Royal Society sobre la geometría óptima de un arco, respondió con un anagrama,



FIG. 6
VILLARD DE HONNECOURT, *Album de dessins et croquis*, siglo XIII. Bibliothèque nationale de France, París.

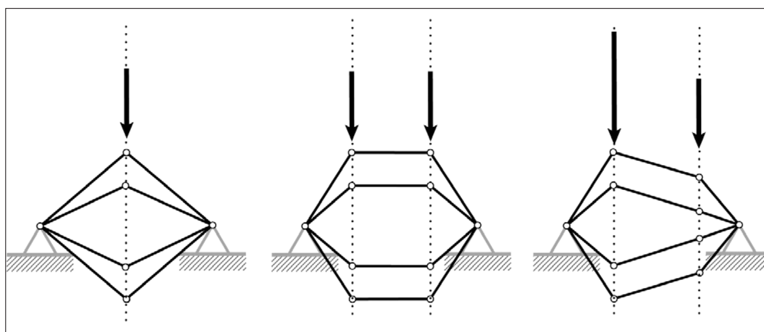


FIG. 7 Geometrías funiculares y antifuniculares, simétricas, para determinadas distribuciones de carga.

cuya solución, revelada después de su fallecimiento, fue «*Ut pendet continuum flexile sic stabit contiguum rigidum inversum*», o sea «como cuelga un hilo flexible, así invertido, se encuentran las piezas contiguas de un arco» (Hooke, 1676). Hooke descubrió que la forma eficiente de definir la geometría de un arco se basa en el empleo del principio de la inversión de un hilo funicular (la geometría alcanzada por una cuerda, sin rigidez a flexión, sobre el cual actúan unas cargas determinadas), adoptando su forma «dual»: la única diferencia es que los esfuerzos esta vez no son de tracción, sino de compresión.

Basada en este dualismo, la figura 7 ilustra diferentes geometrías funiculares y antifuniculares, simétricas, para determinadas distribuciones de cargas. Para cada distribución de cargas existen infinitas líneas funiculares o antifuniculares. Basta con variar las reacciones horizontales o, de manera afín, las flechas del hilo/arco, o su longitud total, para obtener infinitas configuraciones funiculares que están sujetas solamente a esfuerzos axiles.

Unos años después de Hooke llegó otra contribución fundamental, esta vez por parte de David Gregory (1659-1708), que afirmó: «un arco es estable cuando una catenaria está contenida en su espesor» (Gregory, 1697). Esta conclusión, aunque no del todo correcta, es la que efectivamente representa el concepto fundamental que está detrás de la comprobación de las estructuras de fábrica.

La primera aplicación de este nuevo concepto se dio en el análisis de la estabilidad de la cúpula de San Pedro en Roma. En 1743, Benedicto XIV, preocupado por el estado de la cúpula de la basílica, y tras dirigirse a eminentes matemáticos que no habían sido capaces de resolver el problema, contactó con Giovanni Poleni (1683-1761) para estudiar el caso. Poleni, utilizando las ideas de Hooke y Gregory, desarrolló un modelo físico representado por una cadena de la que colgó los pesos correspondientes a los 50 elementos diferentes en que había dividido el arco (Poleni, 1747). Fue capaz así de definir la correspondiente geometría funicular y su dual, la antifunicular, lo que permitió comprobar la estabilidad de la cúpula.



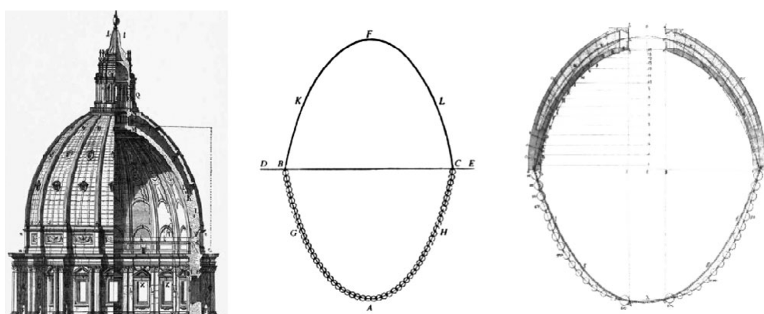


FIG. 8 G. POLENI, *Memorie istoriche della gran cupola del tempio vaticano*, 1747, Padua.

El mismo concepto desarrollado por Gregory es el utilizado hoy en día para el análisis de estructuras de fábrica. Como se verá más detalladamente en el próximo apartado, con este procedimiento se puede comprobar la estabilidad de estructuras existentes que trabajan a compresión, identificando las líneas antifuniculares con las líneas de empujes. En este caso, para garantizar su estabilidad, hay que encontrar una línea de empujes que esté contenida en el espesor del elemento estructural.

PLANTEAMIENTO ACTUAL: ANÁLISIS CLÁSICO EN UN MARCO TEÓRICO MODERNO

El planteamiento actual de un análisis basado en líneas de presiones se fundamenta en las siguientes tres hipótesis (Heyman, 1995) relativas a la fábrica:

1. Resistencia infinita a compresión.
2. Resistencia nula a tracción.
3. Resistencia infinita a cortante.

Estas tres hipótesis se pueden resumir diciendo que la fábrica se comporta como un material perfectamente plástico en tracción y perfectamente rígido en compresión y cortante.

Las hipótesis 1 y 3 se basan en que, generalmente, el nivel tensional al que está sometida la fábrica es infinitamente menor que su resistencia a compresión y a cortante. No obstante, suponer infinitas las capacidades resistentes de los materiales puede quedar en algunos casos del lado de la inseguridad. En otras palabras, es condición necesaria, pero no suficiente, encontrar una situación equilibrada (una línea de empujes situada en el interior de la fábrica) para seguir con el proceso de análisis, que consiste en comprobar si el estado tensional no sobrepasa el límite definido por la envolvente de rotura de Mann-Müller (Martínez, 2003). Finalmente, la hipótesis 2 está del lado de la seguridad y se basa en el hecho de que la resistencia a tracción de la fábrica es muy pequeña y poco fiable.

En el marco de este análisis basado en línea de presiones, tienen utilidad los planteamientos de los teoremas del límite inferior y del límite superior de la Teoría de la Plasticidad. El teorema del límite inferior, aplicado a las estructuras de fábrica, se puede enunciar de la siguiente manera:

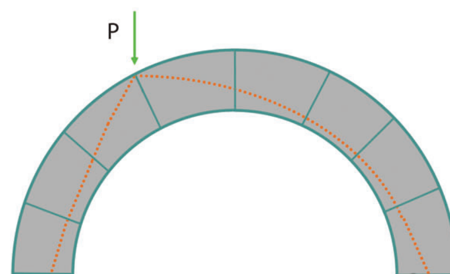


FIG. 9 Línea de presiones contenida holgadamente en el contorno de la estructura: estructura estable y segura.

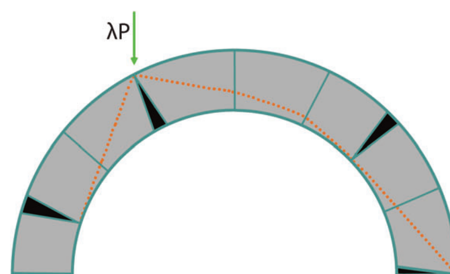


FIG. 10 Línea de presiones tangente a los contornos de la pieza, provocando la aparición del número estricto de rótulas que la convierten en mecanismo cinemático. La carga λP es la cota superior de la carga de colapso.

«Si es posible encontrar una línea de presiones que se encuentre en equilibrio bajo la acción de las cargas exteriores, y sea interior al espesor de las piezas, la estructura será estable para esas cargas, y por tanto que son inferiores a la de colapso».

Cabe recordar que las estructuras de fábrica son hiperestáticas (un arco sería isostático si tuviese tres rótulas) y solo las ecuaciones de equilibrio se utilizan en este análisis. Consecuentemente, habrá infinitas líneas de presiones correspondientes a la misma distribución de cargas. Hay que asegurarse de que por lo menos una de ella esté contenida en el espesor de la pieza.

Asimismo, el teorema del límite superior, aplicado a las estructuras de fábrica, se puede enunciar de la siguiente manera:

«Si es posible encontrar una línea de empujes en equilibrio, completamente contenida dentro de la fábrica y que produce suficientes rótulas para convertir la estructura en un mecanismo, la carga asociada es de colapso».

Para este tipo de análisis se propone el formato de seguridad de los coeficientes parciales, es decir, se trata de comprobar si

$$\gamma_G G + \gamma_{Q1} Q_1 + \sum_{i>1} \psi \, \gamma_{Qi} Q_i \leq \frac{R_k}{\gamma_m} \tag{1}$$

expresión en la que la capacidad resistente *R* se puede expresar en términos geométricos (línea de presiones, vuelco o deslizamiento) o de agotamiento de la capacidad resistente (Martín-Caro, 2001).

En el análisis estructural de las obras de fábrica debe tenerse en cuenta la presencia de los rellenos porque, como se ha evidenciado en recientes trabajos de investigación (Ramos, 2015), estos tienen diferentes misiones estructurales: añaden cargas y acercan la línea de presiones a la línea baricéntrica para que la estructura pueda mejorar su comportamiento frente a la excentricidad que produce en la línea de empujes la presencia de las sobrecargas (significativas en puentes ferroviarios y, a partir del siglo XX, también carreteros). Es interesante notar cómo la colocación de pesos sobre elementos estructurales destinados a recibir empujes (arbotantes, rellenos o muros de contención por gravedad) con el fin de verticalizar la resultante, es un ejemplo de pretensado ya utilizado en la construcción romana y, después, en la gótica, si bien la diferencia sustancial con el pretensado moderno es que mientras este es autoequilibrado, las cargas añadidas incrementan las reacciones.

LA METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA DE LÍNEAS DE EMPUJES

Ambos enfoques, clásico y moderno, del análisis de estructuras de fábrica se basan en la comprobación de un posible estado de equilibrio entre líneas de empujes admisibles (interiores a la pieza) y fuerzas exteriores. Con ese propósito se han empleado diferentes procedimientos a lo largo del tiempo para encontrar la línea de empuje correspondiente a

una determinada distribución de cargas exteriores. Probablemente, la forma más pedagógica consiste en el empleo de una cadena como hiciera Poleni, como ya se ha señalado. Esta vía analógica, basada en modelos físicos, ha sido poco utilizada a lo largo del tiempo (Huerta, 2006).

Un procedimiento alternativo muy utilizado para la búsqueda de líneas de empujes se basa en la utilización de la estática gráfica. Esta técnica se basa en la dualidad entre polígono funicular y polígono de fuerzas, introducido por Pierre Varignon en *Nouvelle mécanique ou statique* (1725) [FIG. 11], para encontrar la geometría de elementos que trabajan únicamente con esfuerzos axiles (Varignon, 1725).

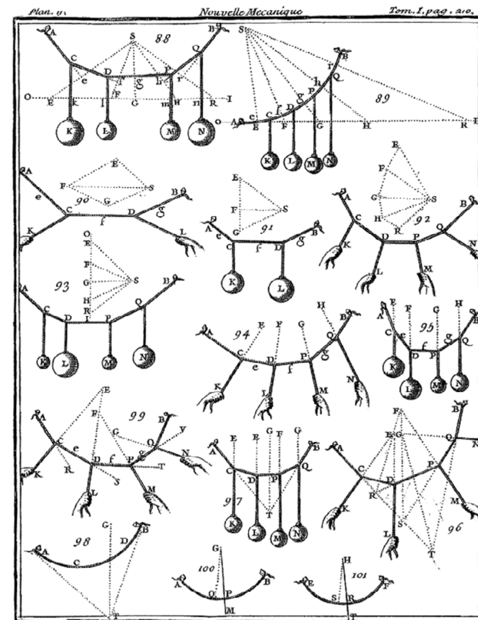


FIG. 11 P. VARIGNON, *Nouvelle mécanique ou statique*, 1725.

Dichas construcciones gráficas han sido usadas hasta muy recientemente para evaluar el correcto funcionamiento de las estructuras de fábrica. En la segunda mitad del siglo XX, Luis Moya Blanco (1904-1990) certifica la estabilidad de los arcos principales de la parroquia de Nuestra Señora de la Araucana en Madrid utilizando la misma construcción gráfica desarrollada por Varignon dos siglos antes (Rojo, 2015).

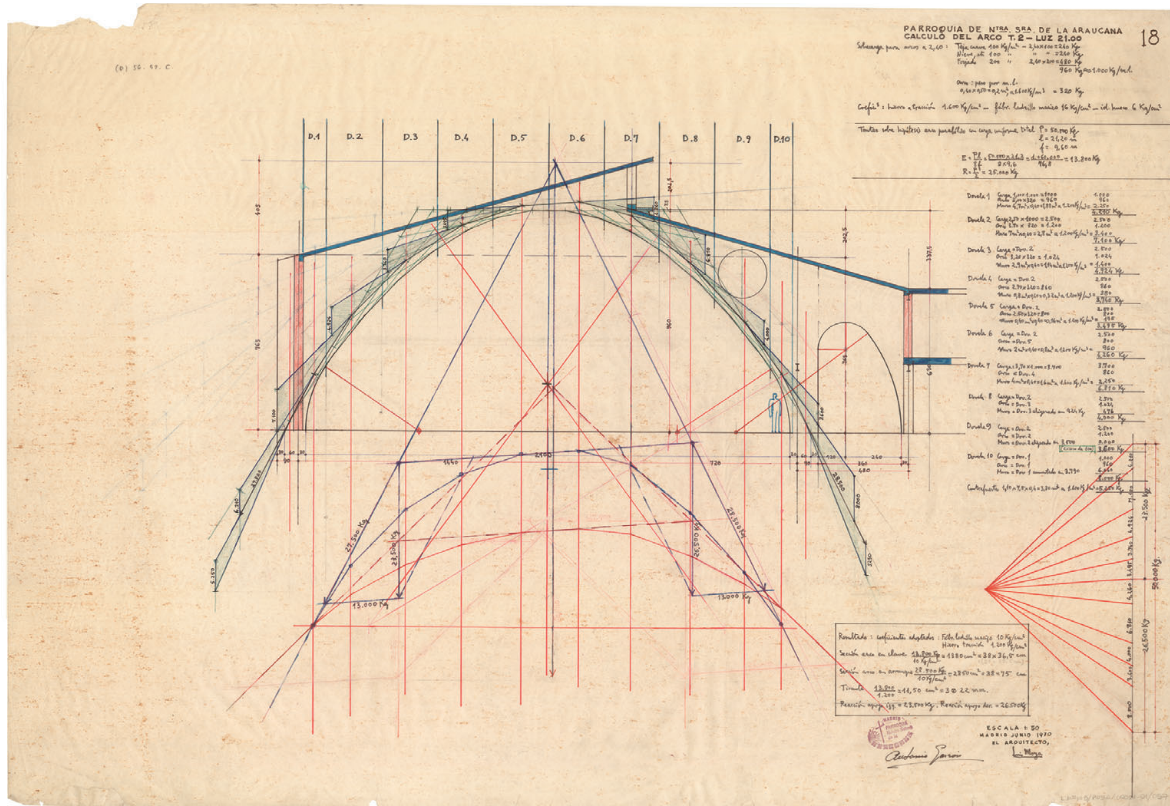


FIG. 12 LUIS MOYA BLANCO, Proyecto de la parroquia de Nuestra Señora de la Araucana, 1970, Madrid.

Finalmente, además de los métodos físicos y gráficos, otra alternativa para definir la línea de empujes se basa en la siguiente analogía. Considerando un elemento infinitesimal de hilo sometido a cargas verticales $q(x)$, la proyección horizontal H del esfuerzo axil es, por equilibrio, constante en todas las secciones. La ecuación diferencial de la curva funicular se puede expresar como:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{q(x)}{H} \quad (2)$$

La ecuación (2) tiene la misma forma que la ecuación diferencial de la línea elástica:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (3)$$

Esta analogía evidencia claramente que la forma funicular es la misma del diagrama de momentos de una viga de igual luz sometida a las mismas cargas (Timoshenko, 1953). Por definición de curva funicular, los momentos en cualquier punto de la geometría deben ser nulos. Así, conocida la flecha del arco, es posible encontrar las coordenadas de los puntos que componen la geometría de la curva funicular. Los momentos $M(x)$ en un arco genérico se pueden expresar como:

$$M(x) = M_o(x) - H.\, y(x) \quad (4)$$

donde $M_o(x)$ es el momento producido por las mismas cargas sobre una viga biapoyada, $y(x)$, la ordenada de los puntos respecto al punto de paso de H, que es la reacción horizontal. Si se busca el antifunicular $M(x)$ tiene que ser igual a cero, luego de (4) se deduce la curva funicular como:

$$y(x)=M_o(x) \,/\, H \quad (5)$$

Los tres métodos reseñados de búsqueda de líneas de empujes (físicos, gráficos y computacionales) muestran maneras equivalentes de explorar las infinitas líneas de empujes para una distribución definida de cargas, cada uno con sus peculiaridades y limitaciones: utilizar materiales con características mecánicas diferentes en modelos físicos, mover el polo en la estática gráfica o variar la reacción horizontal en el método de los momentos representan diferentes maneras para explorar diferentes líneas de empujes.

EVOLUCIÓN FUTURA

Los métodos gráficos descritos anteriormente se han visto sustituidos en las últimas décadas por procedimientos computacionales basados en modelos de elementos finitos o asimilables a ellos, pero que requieren de una información muy difícil de facilitar.

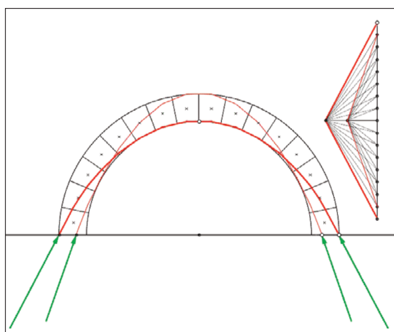


FIG. 13 Block Research Group, eQuilibrium (http://block.arch.ethz.ch/).

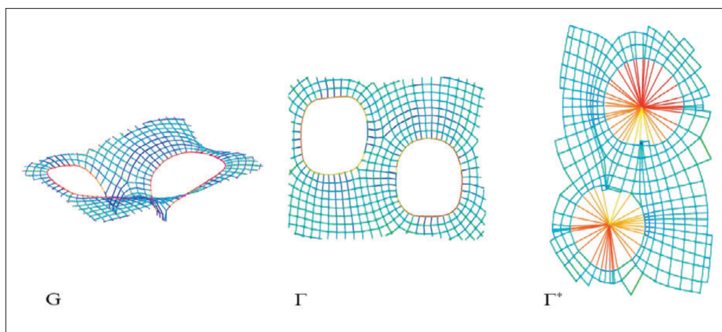


FIG. 14 Block Research Group, RhinoVault (http://block.arch.ethz.ch/).

Sin embargo, muy recientemente se han desarrollado herramientas informáticas que permiten utilizar la estática gráfica de manera sencilla para diseño y análisis de estructuras bi- o tridimensionales (Todisco, 2016). Ejemplos de estas herramientas son Active Statics, eQuilibrium [FIG. 13] para arcos y RhinoVault [FIG. 14] para bóvedas.

El progreso más reciente todavía de programas paramétricos e interactivos permitirá el desarrollo de nuevas herramientas basadas en construcciones gráficas para el análisis de estructuras existentes. Dichas metodologías, gracias a lo esencialmente conceptuales y enormemente visuales que resultan, invitan a los técnicos a reflexionar más sobre el funcionamiento estructural, cosa que no siempre sucede con herramientas más convencionales.

También los modelos físicos, en desuso en los últimos decenios, podrían volver a ser medios interesantes debido al desarrollo de impresoras 3D de tamaño cada vez más grande y de máquinas de control numérico computarizado.

Las herramientas virtuales, junto con los modelos físicos, pueden ayudar enormemente en la tarea de comprender el comportamiento de estas estructuras.

CONSIDERACIONES FINALES

Los planteamientos histórico y moderno para el análisis de estructuras de fábrica están basados en la relación indisoluble entre cargas y geometría: una estructura es segura si es posible encontrar una configuración de equilibrio con las cargas exteriores y respetando las condiciones de contorno (límites geométricos de las piezas, fisuras, etc…).

El análisis elástico, comúnmente adoptado entre la segunda mitad del siglo XIX y la primera del XX para el análisis de estructuras de fábrica, ha sido descartado como metodología válida debido a las numerosas incongruencias entre sus hipótesis y la realidad.

Asimismo, se han enunciado diferentes metodologías alternativas para la definición de la línea de empujes a partir de unas condiciones de contorno y una distribución de cargas. Finalmente se ha planteado una serie de desarrollos futuros basados en herramientas paramétricas e interactivas que pueden sin duda favorecer la utilización de metodologías más visuales, beneficiosas para el entendimiento del complejo funcionamiento de las estructuras de fábrica.

BIBLIOGRAFÍA

BAUDER, E. y LEÓN, J. (2003), «Significado de los glosarios técnicos. El ejemplo de los puentes de fábrica», en *Las lenguas para fines específicos y la sociedad del conocimiento*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid y AELFE (Asociación Europea de Lenguas para Fines Específicos).

Block Research Group (2016), http://block.arch.ethz.ch/.

GREGORY, D. (1697), «Catenaria», *Philosophical Transactions*, nº 231, 637.

HONNECOURT, V. DE (siglo XIII), *Album de dessins et croquis*, París, Bibliothèque nationale de France.

HEYMAN, J. (1995), *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture*, Cambridge-New York, Cambridge University Press.

HOOKE, R. (1676), *A description of helioscopes and some other instruments*, Londres, T.R. for John Martyn.

HUERTA, S. (2005), «Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio», *Informes de la construcción*, vol. 57, nº 496, pp. 71-89.

HUERTA, S. (2006), «Structural design in the work of Gaudi», *Architectural Science Review,* vol. 49, nº 4, pp. 324-339.

KURRER, K. (2008), *The history of the theory of structures from arch analysis to computational mechanics,* Berlín, Ernst & Sohn.

MARTÍN-CARO, J. A. (2001), *Análisis estructural de puentes arco de fábrica: Criterios de comprobación*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

MARTÍNEZ, J. L. (2003), *Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

POLENI, G. (1747), *Memorie istoriche della gran cupola del tempio vaticano*, Padua, Stamperia del Seminario.

RAMOS, A. (2015), *Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos*. Tesis doctoral. Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

ROJO MARCÉN, S. (2015), *Análisis estructural de la obra de Luis Moya Blanco*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

TIMOSHENKO, S. (1953), *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*, Nueva York, McGraw-Hill.

TODISCO, L. (2016), *Funicularity and Equilibrium for High-Performance Conceptual Structural*, Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

TODISCO, L. y SANITATE, G. (2016), «Statics of trulli», *Materials and Structures,* vol. 49, nº 7, pp. 2893-2905.

VARIGNON, P. (1725), *Nouvelle mécanique ou statique. Tome premiere*, París, Claude Jombert.

Volver al índice

11
Auscultación de puentes de fábrica

JORGE LEY URZAIZ
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director General de INTEMAC
Profesor Asociado de la ETSICCP. UPM

INTRODUCCIÓN

Los puentes de fábrica suponen alrededor del 40 % de los puentes de la red de carreteras y ferrocarriles en Europa. La gran mayoría fueron construidos entre 1840 y 1910, por lo tienen más de cien años y han sufrido durante su vida un importante incremento tanto de las cargas que soportan como de la intensidad del tráfico sobre ellos respecto a aquellas para las que fueron diseñados. También han sufrido la constante exposición de los agentes atmosféricos, lluvia, viento, corrientes, etc., durante su ya larga vida. Por todo ello, la mayoría presenta daños que exigen reevaluar sus condiciones de seguridad. En esta exposición describiremos las técnicas más usadas para la auscultación y/o investigación de sus características más importantes y también detallaremos aquellas técnicas más empleadas para su monitorización.

EL CICLO VITAL DE LOS PUENTES

El ciclo vital de los puentes guarda muchas similitudes con el de las personas. En la figura 1 (J. León) se plantea que para llevar a cabo el estudio sobre la condición estructural de un puente la primera actividad a realizar es el análisis de la documentación existente sobre su proyecto, construcción y eventuales modificaciones que haya podido sufrir (en la analogía con las personas, el médico de cabecera al reconocer por primera vez a un paciente se preocupará por conocer sus antecedentes médicos, si ha sufrido alguna lesión, si se ha realizado algún análisis o prueba previo, etc.); la segunda de las acciones y probablemente la más importante es una detallada inspección ocular, que ha





FIG. 1 Ciclo vital de los puentes (Prof. J. León).

de realizarse por un técnico que comprenda bien el comportamiento estructural de estos puentes y la importancia de la sintomatología que puedan presentar. Una vez se conozca la geometría aparente del puente, será imprescindible conocer la geometría de sus elementos, para lo cual haremos uso de las técnicas que más adelante veremos. Una vez diagnosticada la situación del puente, recomendaremos probablemente unas actuaciones a realizar para paliar algunos de los defectos observados y quizá unas actividades de monitorización para verificar que esas acciones han dado resultado o, por el contrario, esa monitorización puede avisarnos sobre la necesidad de arbitrar otras medidas.

TÉCNICAS DE AUSCULTACIÓN A EMPLEAR EN PUENTES DE FÁBRICA

La primera reflexión que se debe de realizar cuando nos enfrentemos a la caracterización de cualquier puente (de fabrica o de otro material) es meditar sobre la respuesta a estas cuatro preguntas clave:

¿Qué información quiero?
¿Con qué precisión la necesito?
¿Qué técnica me puede dar dicha información con esa precisión?
¿Qué decisiones voy a adoptar en función de los resultados?

Algunas de las técnicas a emplear son caras, otras nos dan un grado de fiabilidad de sus resultados de más/menos un 15 %, por eso es preciso no cargar a nuestro cliente con el coste de la obtención de una información que quizá no sea necesaria.

Técnicas encaminadas a determinar la geometría

Como ya se ha señalado la actividad más importante es la correcta definición geométrica del puente, para ello en lo que respecta a su geometría exterior basta contar con un flexímetro, una plomada, un distanciómetro láser y una cuerda, con estos sencillos útiles dos personas pueden levantar y definir en alzado y sección las formas exteriores de la gran mayoría de los puentes. En ocasiones puede resultar aconsejable realizar un levan-





FIG. 2 Escaneos en 3D con un equipo FARO.

tamiento topográfico del mismo, que si se une a una campaña de restitución fotográfica puede resultar muy útil también para la correcta identificación y posicionamiento de las anomalías y daños que presente el puente. En los últimos años la técnica del escaneo en 3 dimensiones de estas estructuras nos puede facilitar (y abaratar) enormemente estas tareas ya que consiguen levantar planos con gran precisión (en general podemos restituir puntos que están situados a 50 m del equipo con precisión superior a los 2 mm, lo que es más que suficiente).

Extraordinariamente útiles para precisar el espesor de los distintos elementos estructurales son los sondeos, tanto los realizados en general con los equipos de geotecnia desde el mismo tablero por lo común en la vertical de las pilas y que permiten obtener la configuración de las mismas, espesor de paquete de firme, espesor de rellenos, espesor de fabrica, espesor de zapata y estado del pie de la cimentación, como los realizados mediante sondas de extracción de probetas testigo en horizontal (es posible extraer hasta 200-250 cm). Estos taladros son además también muy útiles para la inspección con endoscopio (también llamado boroscopio) que nos permiten detectar la presencia de fisuras, el estado de los rellenos, etc.



FIG. 3 Inspección con boroscopio del relleno de un puente de fábrica y vistas de muestras obtenidas mediante sondeos (Cortesía INTEMAC).

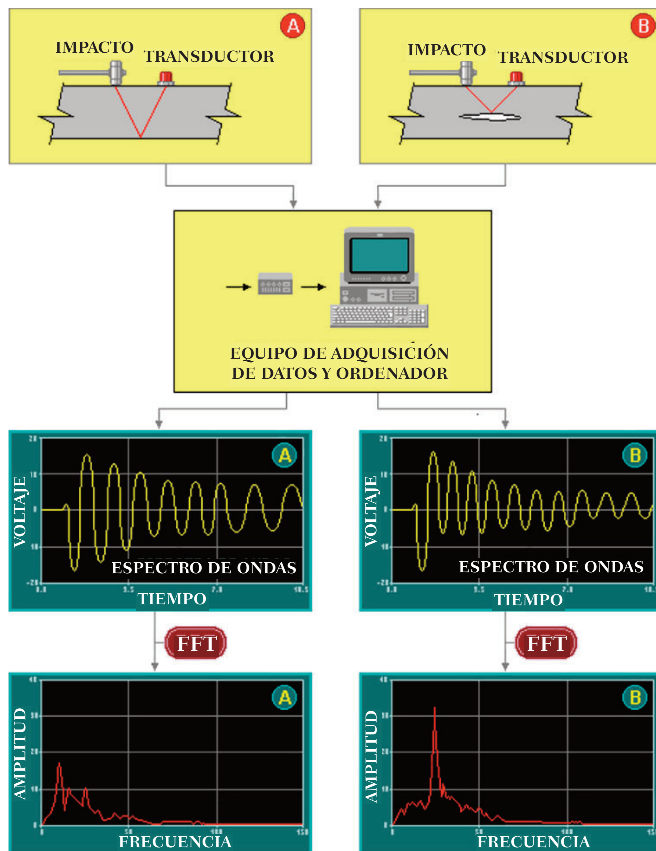


FIG. 4 Proceso del ensayo de impacto-eco.

Mediante las <u>técnicas sónicas</u> también pueden verificarse los espesores de las distintas partes de los puentes, si bien el empleo de estas técnicas debe ser llevado a cabo por técnicos experimentados que desarrollen dichas técnicas (ECO-SONICO, velocidad de impulso ultrasónico, impacto eco, sísmica paralela, etc.) y conozcan sus limitaciones. Especialmente interesantes son, en mi opinión, el impacto eco y la sísmica paralela. El **impacto-eco** se emplea para conocer el espesor de elementos tipo placa de menos de 50 cm. La técnica consiste en excitar el elemento estructural y posteriormente analizar en el dominio de la frecuencia el espectro de la onda que recibe otro sensor adherido a la estructura.

La **sísmica paralela** es una técnica frecuentemente utilizada para determinar la profundidad de una cimentación. En primer lugar se debe realizar un sondeo lo más próximo posible a la cimentación, después se golpea la pila o la parte superior de la cimentación, a la vez que se va determinando la energía o el tiempo en el que se captan esos impactos con un sensor de ultrasonidos que se coloca en el sondeo realizado, donde previamente se ha realizado su relleno con agua para la mejor transmisión de las ondas. Realizando esa operación a distintas profundidades se puede determinar la profundidad de la cimentación porque se detectará un cambio en la pendiente del registro de energía o de velocidad (tiempo) de llegada de la onda.

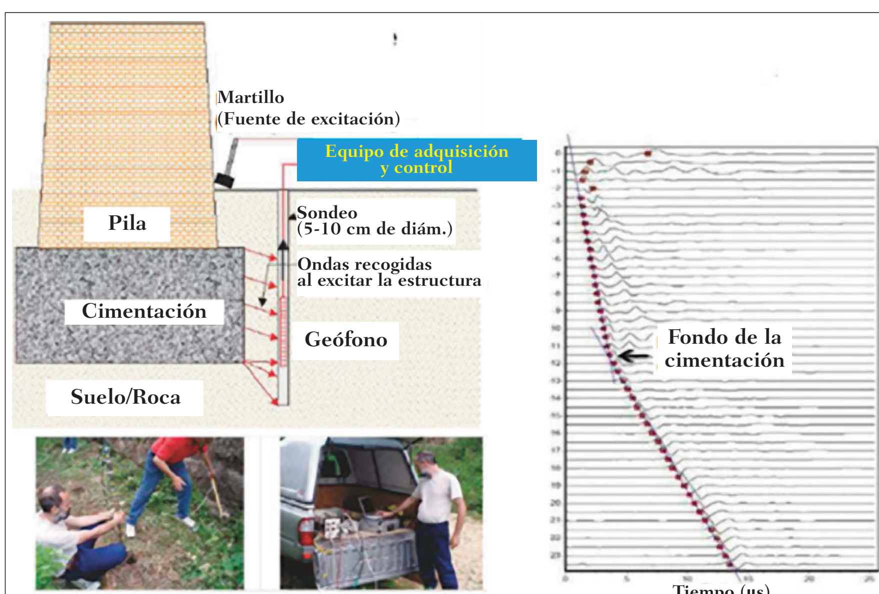


FIG. 5 Técnica de sísmica paralela.

Técnicas utilizadas para el estudio de las características de los materiales empleados y la detección de anomalías

Mediante la **tomografía sónica**, que básicamente es la realización de un gran número de medidas sónicas y su posterior tratamiento con programas desarrollados específicamente para ello, pueden detectarse cavidades o fisuras existentes en puentes de fábrica.

La **medida de la conductividad eléctrica** es otra técnica basada en que la conductividad electromagnética de las fábricas es función de la saturación de agua que posea y de sus propiedades eléctricas, por ello mediante su uso es posible evaluar:

- El contenido de agua en la fábrica.
- El contenido en sales.
- La altura de la humedad provocada por la capilaridad.
- La composición de las fábricas.
- La presencia de coqueras y falta de monolitismo en muros.
- La presencia de elementos metálicos (tubos, refuerzos).

En Gran Bretaña, donde existe gran experiencia en esta técnica, se utiliza a veces para realizar el seguimiento en el tiempo de estructuras, efectuando campañas sucesivas para evaluar posibles cambios. El sistema constan de un transmisor que emite en continuo con frecuencias que oscilan entre los 10 y los 15 Hz y un receptor que registra la señal. Con frecuencias menores se obtienen alcances mayores (hasta 6 metros de profundidad de registro).

La **termografía** es otra de las técnicas también utilizadas para detectar eventuales defectos en las fábricas. La termografía infrarroja es una técnica que permite, a través de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, la medida superficial de temperatura. El instrumento que se usa en termografía para medir es la cámara de infrarrojos. La principal ventaja de la medida de temperatura mediante termografía es que es una técnica de medida sin contacto. En los últimos años las nuevas cámaras termográficas han disminuido mucho de precio y nos pueden servir para apreciar coqueras y anomalías. Las campañas han de realizarse al anochecer o al amanecer porque las cámaras lo que detectan es la distinta temperatura que se manifiesta en los paramentos del puente y es en esos momentos cuando es más fácil observar la eventual presencia de zonas no homogéneas que disiparán el calor de forma distinta.

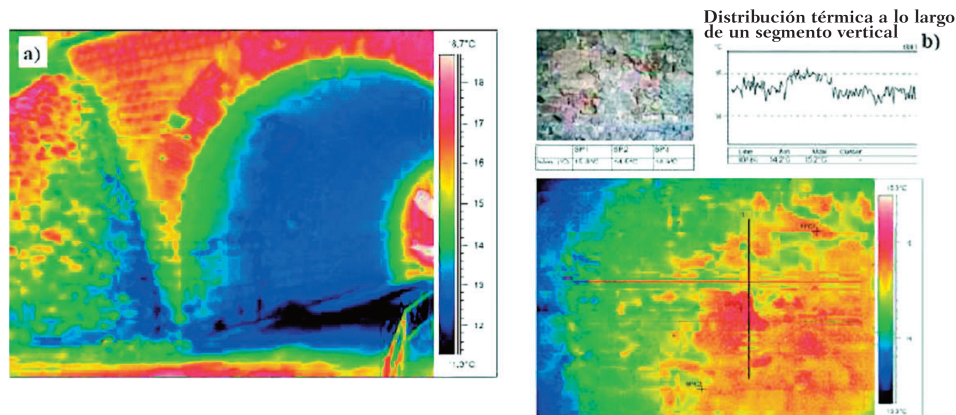


FIG. 6 Termografía de un puente de fábrica.

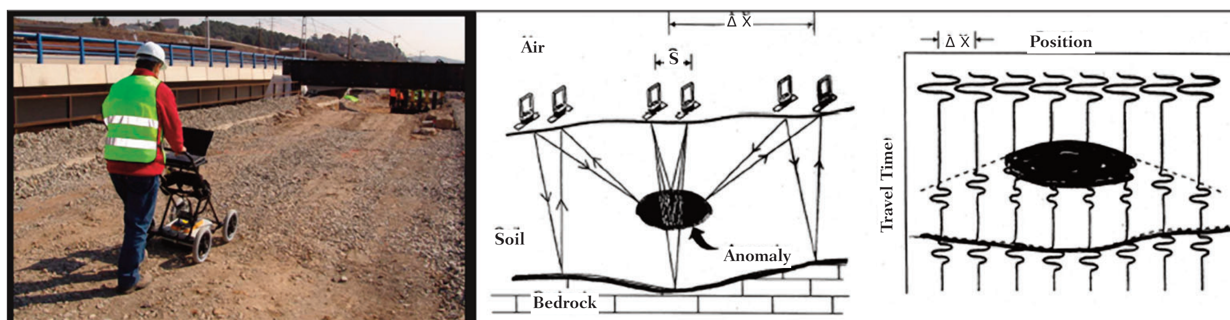


FIG. 7 Empleo del georradar en un puente de fábrica (Cortesía GEOCISA).

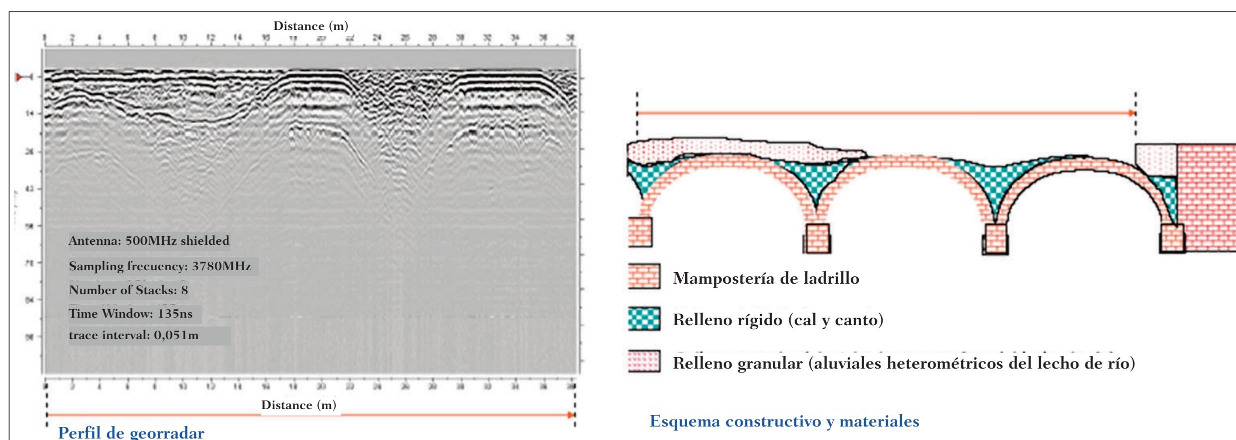


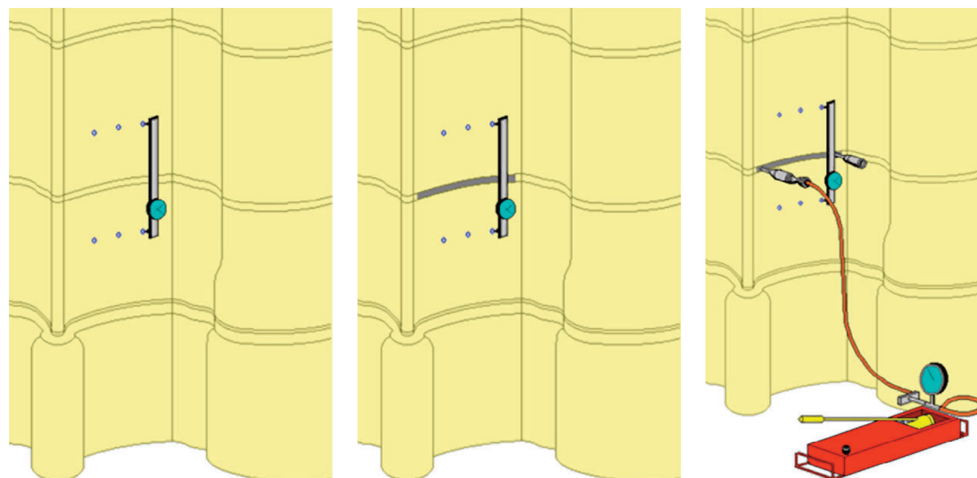
FIG. 8 Interpretación del georradar en un puente de fábrica (Cortesía FHECOR).

El **georradar** (GPR) es una técnica que estudia la reflexión y transmisión de ondas de radio a través de una superficie. Los equipos que se han desarrollado tienen antenas intercambiables que operan entre los 100 MHz y los 1.000 MHz, siendo necesario utilizar las frecuencias más bajas para tener un mayor alcance, pero a costa de una peor resolución. En general es muy difícil confirmar la presencia de oquedades o elementos con precisiones mayores de los 15 cm. Los materiales metálicos provocan zonas sombreadas que a veces enmascaran la existencia de anomalías en las zonas ensayadas. La dificultad de interpretar los resultados de estos equipos exige que su empleo sea realizado por personal muy experimentado y hace que el trabajo de gabinete sea muy laborioso, por el contrario tiene la ventaja de poderse auscultar en obra grandes superficies con rapidez.

Técnicas para la determinación de estados tensionales y de las características tensión deformación de las fábricas

La **técnica de los gatos planos** sirve para la estimación del estado tensional del elemento estructural. Ello se consigue midiendo la deformación liberada en un plano de corte ortogonal a la superficie del elemento, estando situado el plano de corte en una de las capas de mortero existente entre los sillares. El ensayo se encuentra recogido en la norma ASTM C 1196/91 «In situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated

FIG. 9
Pasos en el ensayo de gatos planos.



Using Flat-Jack Measurements». La técnica es *a priori* sencilla: se colocan unas bases de medida a una distancia prefijada, se realiza el ranurado de la fábrica, se introducen los gatos planos y se introduce en ellos presión hasta restituir la distancia entre las bases inicial.

Esta técnica también se utiliza para estimar las condiciones de deformabilidad de las fábricas, lo que se hace entonces es colocar las bases para la medida con extensómetro entre dos ranuras ejecutadas en tendeles paralelos. Se introducen dos gatos en cada una de las ranuras y se va aplicando carga y leyendo las deformaciones que sufre la fábrica. La norma ASTM C 1197 «In situ Measurements of Masonry Deformation Properties using Flat-Jack Method» recoge las prescripciones del ensayo.

En mi opinión no pueden obtenerse precisiones superiores a un ± 20 %.

Con objeto de conocer las características de los rellenos pueden realizarse **ensayos de carga en placa**, determinando la carga aplicada y la deformación del terreno bajo ella.



FIG. 10 Realización de un ensayo con gatos planos. (Cortesía INTEMAC).

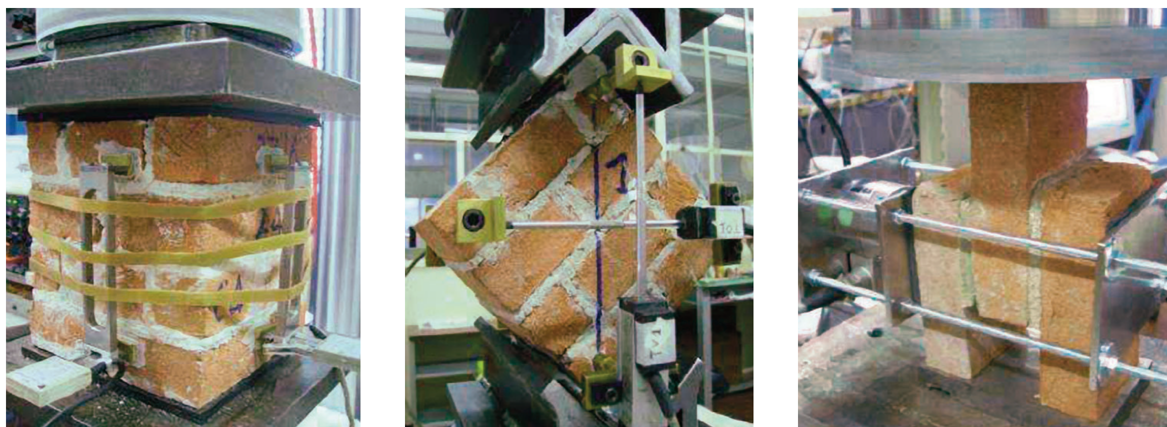


FIG. 11 Realización de ensayos mecánicos sobre muestras de fábrica.

En ocasiones es posible y recomendable extraer muestras de los materiales para realizar **ensayos en laboratorio** y evaluar sus características, en estos casos es siempre imprescindible tener en cuenta que la extracción de las muestras puede alterar sensiblemente sus características y que el efecto tamaño es también importante. Los ensayos que más comúnmente se realizan son los ensayos de compresión simple de la fábrica, aunque también se realizan ensayos a corte.

Las **pruebas de carga**, ensayos de gran utilidad en otro tipo de puentes, en esta tipología no aportan en general una información interesante ya que se trata en general de estructuras muy rígidas por lo que los eventuales desplazamientos que se puedan generar introduciendo cargas, bien sean máquinas y tolvas si se trata de estructuras ferroviarias o bien mediante camiones, son muy reducidos en general (inferiores a 2 o 3 décimas de milímetros y 2 o 3 μd bajo la carga total), por lo que el interés que esta clase de ensayo tiene es bajo ya que no es posible conocer si el comportamiento es elástico, las flechas remanentes tienen el orden de magnitud de las variaciones causadas por variaciones ambientales, etc. Los equipos que en principio se utilizan para estas pruebas de carga son los tradicionales: sensores de desplazamiento LVDT, o extensométricos, inclinómetros, acelerómetros piezoeléctricos, bandas extensométricas. En ocasiones sí se realizan ensayos dinámicos en general para contrastar la fiabilidad del modelo de cálculo utilizado. En estos casos el puente se puede excitar haciendo pasar un camión sobre el «Tablón RILEM» o se puede utilizar, si es el caso, la propia excitación originada por la acción del viento sobre la estructura. Estos ensayos se han utilizado también para estudiar si cambios en la respuesta dinámica de los puentes pudieran ser indicativos de la evolución de patologías existentes.

Técnicas para la monitorización de los puentes de fábrica

En general llamamos monitorización a la inspección de forma continua para detectar y registrar la aparición de daños que puedan alterar la seguridad y/o funcionalidad de la estructura. Como ya se ha señalado en otras ponencias de este curso, estas estructuras funcionan básicamente por forma, por ello en principio parece que los parámetros más

importantes a controlar serán aquellos que signifiquen un cambio en la geometría de los puentes.

Es conocido que el colapso de la mayor parte de los puentes de fábrica es consecuencia directa o indirecta de problemas de socavación de las pilas, por ello se han desarrollado diversos sensores capaces de monitorizar este fenómeno. A continuación señalamos las características más significativas de cada uno de ellos así como sus ventajas y desventajas:

Sensores para detectar problemas de socavación

Columna de sondeo: Básicamente consiste en una barra vertical, sujeta por una estructura, que puede descender verticalmente. Midiendo ese descenso se puede inducir la erosión producida en el punto de apoyo de la barra con el lecho.

Collar magnético deslizante: Está formado por una barra vertical clavada en el suelo y que sirve de guía a un conjunto de anillos magnéticos que se apoyan sobre el fondo del lecho. En el interior de la barra se instalan equidistantemente una serie de sensores capaces de determinar la posición de los anillos. Conociendo su posición se puede inferir la erosión producida.

Radar sónico: Este equipo se basa en la emisión de ondas acústicas contra el lecho y en la medición del tiempo que transcurre hasta recibir su eco. Conociendo la velocidad de la onda en el agua, se obtiene la distancia al lecho, que irá aumentando al producirse mayor erosión.

Sensores de película piezoelécrica: Este tipo de sensores son sensibles a las vibraciones producidas por la corriente de agua. Montados sobre un barra vertical situada frente a la pila del puente y detectando qué sensores son agitados por la corriente podemos conocer el alcance de la erosión.

Sensores o emisores enterrados: Son un conjunto de sensores que se colocan enterrados frente a la pila del puente. Cuando se va produciendo la erosión se van desenterrando, momento en el que empiezan a emitir una señal detectable.

Los inconvenientes más importantes de los dos primeros sensores son las acciones mecánicas sobre las barras a causa de los materiales transportados por la corriente. Tambien existe el riesgo de que el desplazamiento de las partes móviles quede impedido por depósitos de partículas o incluso por crecimiento de vegetación, además de por los golpes. Estos sensores solo sirven para determinar la erosión máxima. Para devolverles plenamente su funcionalidad después de una crecida (descenso del fondo y ascenso posterior) es necesario desenterrarlos.

El radar sónico tiene menos inconvenientes en cuanto a golpes pero su medida puede ser difícil de obtener o de interpretar también en caso de corrientes con mucho transporte en suspensión. Determina la evolución del fondo descendiendo y también ascendiendo. Solo es útil cuando el nivel del río esté por encima del sensor.

Los sensores o emisores de radio enterrados podrían considerarse un sistema atractivo pero aún se encuentran en una fase experimental, mientras que hay ya suficientes casos reales de aplicación de los sistemas que emplean los tres primeros tipos de

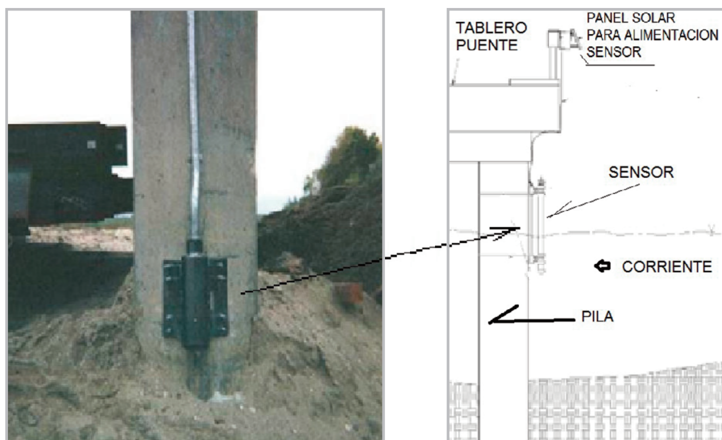


FIG. 12 Radar sónico colocado en una pila.

sensores. El coste de estos sistemas está en el orden de los 20.000 €.

Los **inclinómetros** son usados comúnmente en la instrumentación de puentes de fábrica ya que su estabilidad en el tiempo es buena y es posible conocer el valor límite que debe hacer saltar la alarma sobre alguna incidencia. Los más comunes son los piezoeléctricos aunque también hay de otros tipos.

Obviamente, para detectar la eventual evolución de abertura de fisuras es habitual el colocar **transductores de desplazamiento**, LVDT, extensómetricos, de cuerda vibrante, etc. Todos estos sensores se conectan a equipos de adquisición y control que pueden ser alimentados por placas solares y controlados los parámetros monitorizados a través de Internet o mediante comunicación telefónica si están en sitios remotos. En los últimos años está desarrollándose toda una industria de sensores inalámbricos que pueden abaratar sensiblemente la implantación futura de estos sistemas.

REFLEXIONES SOBRE LA NECESIDAD DE UN CAMBIO DE ENFOQUE AL PERITAR UNA ESTRUCTURA EXISTENTE

José María Izquierdo, experto en la modelización y el peritaje de estructuras de fábrica, durante los muchos años que, en INTEMAC, estuvo enseñándonos a enfrentarnos a la evaluación de estas bellas estructuras, no paró nunca de darnos estos sabios consejos que no puedo por menos que reproducir a continuación para darles la mayor difusión, ya que están sobrados de sentido común:

- El peritaje y el Proyecto de una estructura tienen planteamientos de principio intrínsecamente diferentes.
- En Teoría de Sistemas, el Proyecto de una estructura pertenece al grupo de los llamados sistemas *de primera categoría,* mientras que el peritaje de una estructura existente pertenece al grupo de los llamados sistemas *de segunda categoría*.
- No se trata de determinar la solución estructural a un estado de cargas definido apriorísticamente (sistema *de primera categoría*) sino la respuesta de una estructura concreta a unas solicitaciones *reales* a lo largo del tiempo y a las futuras *posibles* (sistema *de segunda categoría*).
- En otras palabras: No se trata de definir la estructura que debe diseñarse con las técnicas y conocimientos actuales, sino de averiguar cómo se comporta realmente la estructura dada.

- Las Instrucciones actuales tienen como objetivo orientar al Técnico en el Proyecto y en la Ejecución de la Obra. No están orientadas y, por ello no son de aplicación directa en general, para evaluar la capacidad resistente de estructuras ya construidas.
- No es técnicamente admisible decir que una pilastra o un muro es inseguro simplemente porque incumpla la normativa vigente, cuando ha demostrado su capacidad a lo largo de hasta seis o siete siglos de funcionamiento. Ese sería un planteamiento de abogado, no de ingeniero.
- Las simplificaciones usuales realizadas en los cálculos de estructuras no pueden hacerse sin estudiar detalladamente sus consecuencias, y los coeficientes habituales de seguridad de materiales o de acciones simplemente carecen de sentido.
- Las normas existentes son válidas para proyectar, no para peritar. Resulta irreal expresar el nivel de seguridad de una estructura antigua en los términos usualmente empleados de estados límites últimos y estados límites de servicio.
- Debe tenerse en cuenta que los errores de ejecución previstos en el establecimiento de los coeficientes de ponderación *ya han sido cometidos*.
- La seguridad exigible debe ser función de la vida útil prevista para la obra y del nivel de conocimiento sobre los materiales y la ejecución. Solo un planteamiento a partir de estudio de fiabilidad *podría* evaluar la seguridad de la estructura existente *si se tuvieran datos suficientes y fiables*.
- Los valores tabulados usados habitualmente están establecidos para procesos de construcción actuales, y vidas útiles de las estructuras moderadas (entre 50 y 75 años).
- Se carece de datos estadísticos suficientes para establecer, con la fiabilidad a que estamos acostumbrados, el valor de las acciones de viento o de los esfuerzos de origen sísmico, por ejemplo, con un período de recurrencia mínimo de 500 años, como resulta imprescindible en estos casos.
- Las acciones extraordinarias distan mucho de serlo, y con gran generalidad, lo ordinario es que se hayan producido efectivamente alguna vez a lo largo de la vida del edificio o del puente, si tiene edad suficiente.
- Las tolerancias de construcción actuales no tienen nada que ver con las existentes en la época de construcción de las estructuras que debemos interpretar.
- La dispersión de resultados puede ser determinante en el comportamiento del edificio.
- No resulta posible obtener toda la información que sería deseable para poder elaborar un modelo suficientemente representativo, pues el número de determinaciones a realizar debería ser muy elevado.
- La precisión de los métodos de cálculo actuales está condicionada a la constancia de las características de los materiales a lo largo de la obra, y ello obliga a establecer exigencias de control de fabricación y de recepción importantes.
- Los materiales antiguos no son en general reproducibles para ensayos en laboratorio.
- Ni las cales, ni los yesos ni los ladrillos actuales tienen nada que ver con los empleados en los siglos XI al XVII y el conocimiento que tenemos sobre sus medios de

control de fabricación (mucho más que sobre la tecnología general de elaboración) es enormemente imperfecto, cuando no inexistente en absoluto.

- Aunque consiguiéramos reproducir fielmente una fábrica antigua, los resultados que obtendríamos en su ensayo serían de escasa utilidad práctica.
- Las cales modifican sustancialmente sus propiedades con la carbonatación, p. ej., y se carece de datos fiables de su endurecimiento, fluencia y merma a muy largo plazo.
- Deberíamos mantenerla en carga durante unos cuantos siglos para observar su comportamiento, y es muy dudoso que, por mucho que avancen la biología y la medicina, vivamos para poder analizarlos en su verdadero valor.
- Debemos tener siempre en cuenta al plantear nuestro modelo dos aspectos importantes:

  – La exactitud de un cálculo es función de la habilidad y la experiencia del técnico que analiza los resultados, y no del volumen de las hojas de cálculo. Un técnico no preparado saca conclusiones menos reales de un armario lleno de desarrollables de ordenador que un buen técnico de los cálculos hechos en el dorso de una servilleta de papel.

  – Las inexactitudes inevitables por causa de la anisotropía de los materiales, la acción de las fuerzas de rozamiento, la plasticidad de la fábrica y las tolerancias geométricas de ejecución muy fácilmente son de orden superior a la ganancia de precisión conseguida al complicar el modelo. Un cálculo más preciso no por ello resultará más exacto. Puede resultar estéril la sofisticación teórica del modelo de cálculo, si no tenemos desde el principio muy claro qué es lo que estamos buscando y por qué.
- No es de recibo plantear estudios con diagramas elasto-plásticos o bilineales de los materiales si ni siquiera podemos establecer un módulo de deformación secante mínimamente fiable.
- Antes de prescindir de la resistencia a tracción de la fábrica, con el argumento de la incapacidad de las juntas para absorber tracciones, debe analizarse la posibilidad de existencia de mecanismos que sean capaces de movilizar la resistencia a tracción de la fábrica, por ejemplo por el aparejo de las piezas.
- Antes de modelizar las grietas existentes, duplicando los nudos y permitiendo su movimiento, deberemos probar el modelo no fisurado, para comprobar que en él aparecen en esas localizaciones tracciones suficientes para justificar la rotura. Si el modelo inicial no representa claramente los daños producidos, no resulta claro que vaya a representar la realidad del comportamiento futuro previsible.
- Si el cálculo estructural dice una cosa y la estructura a lo largo de los siglos dice otra, es ridículo dudar ni por un minuto cuál de los dos está equivocado.
- Una estructura que se ha mantenido en pie durante dos, tres, seis o siete siglos no es razonable pensar que va a colapsar en los próximos dos meses si no intervenimos con urgencia.
- Sin absolutamente ninguna excepción, todas las estructuras que han colapsado a lo largo de los siglos, un segundo antes de caerse estaban todas en pie.

BAYRAKTAR, A., TEMEL, T. y ALTUNIŞIK, A. (2015), «Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges», *Construction and Building Materials*, vol. 75, enero, pp. 234-241.

BINTRIM, J. W., LAMAN, J. A. y BOOTHBY, T. E. (1998), «Dynamic testing of masonry arch bridges», en *Arch Bridges : History, analysis, assessment, maintenance and repair. Proceedings of the Second International Arch Bridge Conference* (Venecia, 6-9 octubre 1998), A.A. Balkema, pp. 295-303.

BONET PIÑOL, F. (2005), Instrumentación de puentes ante la erosión local en pilas. Aplicación a un caso (río Besós). Tesina Ingenieria Geológica. Universitat Politècnica de Catalunya.

CAGLAYAN, B. O., OZAKGUL, K. y TEZER, O. (2012), «Assessment of a concrete arch bridge using static and dynamic load tests», *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 41, nº 1, pp. 83-94.

CHOI, S., PARK, S. y STUBBS, N. (2005), «Non-destructive Damage detection in Structures using Changes in Compliance», *International Journal of Soils and Structures*, 42, pp. 4494-4513.

ELLENBERG, A., KONTSOS, A., MOON, F. y BARTOLI, I. (2016), «Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery», Structural Control Health Monitoring, vol- 23, nº 9, pp. 1168-1179.

HUGHES, T. G. y BLACKLER, M. J. (1997), «A review of the UK Masonry Arch Assessment Methods», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 122, pp. 305-315, agosto.

HUGHES, T. G. y PRITCHARD, R. (1998), «In situ measurement of dead and live load stresses in a masonry arch», *Engineering Structures*, vol. 20, nº 1-2, pp. 5-13.

HUNT, B. (2003), «Monitoring scour around vulnerable structures can be a cost-effective alternative to strengthening works», *Bridge, Design & Engineering*, nº 30, First Quarter.

INVERNIZZI, S., LACIDOGNA, G., MANUELLO, A. y CARPINTERI, A. (2009), «Damage Assessment of a Two-span Model Masonry Arch Bridge», en *Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics* (Albuquerque, NM, 1-4 junio 2009), Society for Experimental Mechanics.

KOLTSIDA, I., TOMOR, A. y BOOTH, C. (2013), «The use of digital image correlation technique for monitoring masonry», en *Proceedings ARCH 2013 - 7th International Conference on Arch Bridges* (Split, 2-4 octubre 2013), SECON - CSSE.

KRAWTSCHUK, A., STRAUSS, A., WENDNER, R. y ZEMAN, O. (2012), «Inspection and Lifetime Assessment for Arch Bridges, en *Proceedings 15th International Brick and Block Masonry Conference* (Florianópolis, Brasil, 3-6 junio 2012), Federal University of Santa Catarina.

LEÓN, J., CORRES, H. y ESPECHE, A., «Ingeniería de mantenimiento de estructuras. Una actividad de futuro», www.fhecor.es

LONDOÑO, N. A. (2006), *Use of Vibration Data for Structural Health Monitoring of Bridges*. Tesis doctoral. Carleton University, Ottawa.

MARTÍNEZ, J. L., MARTÍN-CARO, J. A. y LEÓN, J. (2001), *Caracterización del comportamiento mecánico de la obra de fábrica*. Monografías sobre construcciones históricas. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

McKIBBINS, L. D., MELBOURNE, C., SAWAR, N., SICILIA, C. (2006), *Masonry arch bridges condition: appraisal and remedial treatment*, CIRIA REPORT.

MOLINS, C. y ROCA, P. (1998), «Capacity of Masonry Arches and Spacial Frames», *Journal of Structural Engineering*, 124, pp. 653-663.

MUELLER, D. S. y LANDERS, M. N. (1999), «Portable Instrumentation for real-time measurement of scour at bridges», Publicación nº FHWA-RD-99-085. U.S Geological Survey Water Resources Division. Office of Engineering R&D Federal Highway Administration.

ORBÁN, Z. (2004), «Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Railway Bridges in Europe», en *Proceedings ARCH'04 - 4th International Conference on Arch Bridges* (Barcelona 17-19 noviembre 2004), CIMNE.

PAGE, J. (1990), «Assessment of Masonry Arch Bridges», *Proceedings of the Institution of Highways and Transportation National Workshop*, marzo.

PEETERS, B. (2000), *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. Tesis doctoral. Universidad Católica de Lovaina.

PONNIAH, D. A. y PRENTICE, D. J. (1999), «Long term monitoring of fill pressures in a new brickwork arch bridge», *Construction and Building Materials*, vol. 13, nº 3, abril, pp. 159-167.

QUATTRONE, A., RUOCCI, G., CERAVOLO, R., WORDEN, K. y DE STEFANO, A. (2010), «Non-Linearity Detection in a Masonry Arch Bridge Subject to Artificial Settlements», en *Proceedings of Fifth European Workshop on Structural Health Monitoring* (Sorrento, 29 junio - 2 julio, 2009), DEStech Publications, Inc.

RAMOS, L. F. (2007), *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibrations Signatures*. Tesis doctoral. Universidade do Minho, Braga.

ROCA, P., MOLINS, C., HUGHES, T. G. y SICILIA, C. (1998), «Numerical simulation of experiments in arch bridges», en *Arch Bridges : History, analysis, assessment, maintenance and repair. Proceedings of the Second International Arch Bridge Conference* (Venecia, 6-9 octubre 1998), A.A. Balkema, pp. 195-204.

SCHALL, J. D. y DAVIES, P. (1999), «Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments», *TR News*, nº 203, julio-agosto.

VALLE, L., ZANZI, L, BINDA, L., SAISI, A. y LENZI, G. (1998), «Tomography for NDT applied to masonry structures: Sonic and/or EM methods», en *Arch Bridges : History, analysis, assessment, maintenance and repair. Proceedings of the Second International Arch Bridge Conference* (Venecia, 6-9 octubre 1998), A.A. Balkema, pp. 243-252.

VERSTRYNGE, E., SCHUEREMANS, L., GEMERT, D. V. y WEVERS, M. (2009), «Application of the acoustic emission technique to assess damage in masonry under increasing and sustained axial loading», en *Proceedings of 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09),* (Nantes, 30 junio - 3 julio 2009), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

WERNER, T. y MORRIS, D. (2010), «3D Laser Scanning for Masonry Arch Bridges», en *Proceedings XXIV FIG Congress, Facing the Challenges - Building the Capacity* (Sydney 11-16 abril 2010), FIG, International Federation of Surveyors.

WINTER, W. A. (1995), *Monitoring bridge scour with buried transmitters*, California Department of Transportation, Engineering Service Center, Office of Materials Engineering and Testing Services.

YONGTAO, D. y RUIQIANG, S. (2010), *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology,* Fairbanks, Alaska University Transportation Center, Final Report.

Volver al índice

12
Intervenciones en puentes de piedra o ladrillo

JOSÉ A. MARTÍN-CARO
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor de la ETSICCP. UPM

INTRODUCCIÓN

Existen varias razones que obligan a dar a las intervenciones en puentes de piedra o ladrillo un tratamiento específico. En primer lugar, la importancia cualitativa y cuantitativa de estas estructuras. Su presencia en las diferentes redes de transporte actuales es muy notable, alcanzando en ocasiones porcentajes del 30 % y hasta del 40 % con respecto a la totalidad de los puentes. Por otra parte, su importancia cualitativa es también sobresaliente, ya que muchas de estas estructuras son verdaderos representantes de los avances científicos y tecnológicos del momento de su proyecto y construcción.

En segundo lugar, estos puentes, proyectados y construidos para unas condiciones de explotación muy diferentes de las actuales, son los verdaderos supervivientes de nuestras redes (carreteras, canales y ferrocarril) ya que llevan en pie en ocasiones más de 500 años. Esta capacidad de readaptación a las nuevas cargas y velocidades nos obliga a profundizar en su comportamiento mecánico para conocer de primera mano cuáles son los mecanismos resistentes principales y cómo se deben y pueden reparar y/o reforzar.

En tercer lugar, no existe normativa para la evaluación y tratamiento de estructuras existentes en general ni para estos puentes en particular. Este hecho hace que debamos ser especialmente cuidadosos con todo lo que planteemos y obtengamos a la hora de analizar e intervenir en estas estructuras. El peculiar comportamiento de estos puentes junto con el hecho de que, al ser estructuras vivas, tengan presentes daños de diferentes naturaleza e importancia, hace que sea necesario consensuar unos criterios de análisis e intervención distintos al resto de puentes pertenecientes a otras tipologías más modernas y conocidas.



FIG. 1 Puente sobre el río Adaja. Línea ferroviaria Ávila-Salamanca.

PECULIARIDADES EN LA INTERVENCIÓN EN ESTE TIPO DE PUENTES

¿Rehabilitar, reparar, reforzar o ampliar?

Por desgracia, en demasiadas ocasiones se confunden los términos rehabilitar, reparar y reforzar. Si bien es verdad que existen numerosas maneras de denominar una intervención, también es verdad que se antoja necesario emplear ciertos términos con precisión y sin ambigüedad. Por ejemplo, el técnico debe dictaminar si el puente requiere de una intervención donde se reparen los daños existentes y se restituya su capacidad resistente y durable (reparación), o si necesita de una actuación donde se mejore su funcionalidad (ampliación), o si, por el contrario, el puente requiere de una intervención donde se necesite aumentar la capacidad resistente de la estructura para hacer frente a unos esfuerzos superiores a los esfuerzos para los que estaba preparado (refuerzo).

Las ampliaciones implican un cambio en la fisonomía del puente y un aumento de su longitud total (ampliación longitudinal) o de su sección transversal (ampliación transversal); y bajo el término rehabilitación muchas veces se hace referencia a cualquier tipo de intervención, es decir es un término genérico que engloba todas las anteriores. En otras ocasiones, hace referencia a actuaciones encaminadas solamente a la consolidación, que es, quizás, el término de uso más difuso.

Por todo ello, el técnico, una vez realizado los estudios, análisis, inspecciones y monitorizaciones, debe contestar a una primera cuestión, que es si el puente requiere de ampliación, reparación, refuerzo o una combinación de estas. En definitiva, debe de eva-

luar de una manera precisa si la capacidad portante de la estructura es suficiente o no para resistir las cargas a las que está sometido. Este aspecto es de vital importancia ya que muchas veces se refuerzan estructuras sin necesidad, simplemente porque se detectaron ciertos daños que son mal interpretados en situaciones donde solo se requiere reparación. Por otra parte, a menudo el refuerzo de un elemento estructural dentro del puente, por ejemplo la bóveda, altera la relación de rigideces entre este elemento y el resto, tímpanos, rellenos, etc., generando nuevos y graves problemas. Por tanto, y como ya se ha señalado, es obligado analizar en profundidad cuál es la respuesta estructural del puente ante las cargas solicitantes y evaluar de manera precisa si esta es suficiente.

Obra nueva vs. estructura existente

En esta etapa de evaluación es muy importante remarcar las diferencias existentes en el análisis entre el proyecto de obra nueva y la evaluación de una estructura existente. Para las primeras, la tarea del técnico es comprobar que el diseño propuesto es tal que, en las situaciones pésimas verosímiles que puedan presentarse durante su vida útil, la estructura cumplirá unos requisitos mínimos de seguridad y de condiciones de utilización. Ello se realiza dentro de un contexto semiprobabilista [FIG. 2] que permite un tratamiento manejable de las incertidumbres asociadas a estructuras que, recuérdese, no existen en el momento de ser analizadas. Esta labor es posible gracias al cúmulo de experiencias obtenidas en estructuras similares que han permitido identificar cuáles son los límites de validez (estados límite) y cuáles son las situaciones pésimas de proyecto. Además, existe un consenso entre los profesionales e investigadores competentes sobre los valores límite convencionales de validez, R_d y los solicitantes S_d, resultantes de un cierto método de cálculo. Este consenso se materializa sobre todo en la existencia de normas tecnológicas y de acciones que auxilian (y obligan) al técnico en todo el proceso.

Al juzgar la aceptabilidad de una construcción existente, un puente de fábrica por ejemplo, el objetivo es similar: garantizar la seguridad y suficiencia funcional de la estructura; pero el panorama es mucho más complejo. Las incertidumbres son mucho mayores, el consenso no es ni mucho menos total y, prácticamente, no existe normativa de referencia.

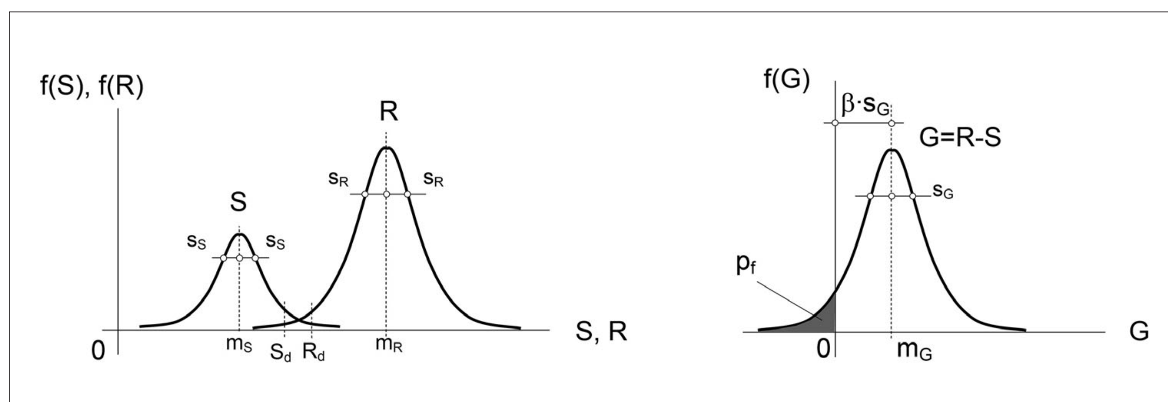


FIG. 2 Esquema de la evaluación semiprobabilista de estructuras nuevas y relación de la comparación entre solicitaciones y esfuerzos admisibles, $S_d \leq R_d$, y el objetivo de asegurar una probabilidad de fallo, p_f, suficientemente pequeña.

En la figura 3 se ilustra la situación del análisis de construcciones existentes mediante un esquema propuesto por el prof. Franco Mola. En dicha figura se ha representado en abscisas el tiempo desde el final de la construcción t_0 en adelante, y en ordenadas, un índice de la resistencia *R,* y de la solicitación *S*. El esquema muestra varias posibilidades para la vida de la construcción. En un primer instante la solicitación $S(t_0)$ es menor que la resistencia inicial $R(t_0)$, de lo contrario se produciría un colapso al descimbrar. En virtud del «teorema de los cinco minutos» comienza un proceso por el cual la resistencia se degrada, curva $R(t)$, y las solicitaciones, en general, crecen, curva $S(t)$.

Una historia «natural» sería la descrita hasta el punto *D*: La solicitación *S* crece con el tiempo mientras la resistencia *R* se degrada por causas naturales a un ritmo normal. En este caso, la vida de la estructura sería T_L.

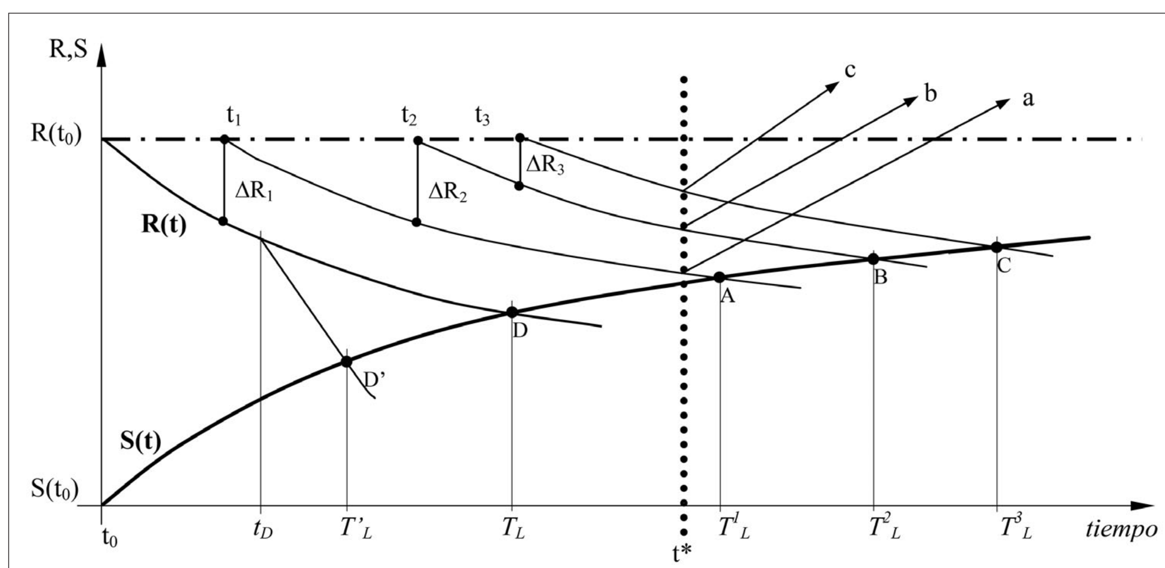


FIG. 3 Esquema de la evaluación de las resistencias *R* y solicitaciones *S* a lo largo de la vida de la estructura.

t_D = *Comienzo de un proceso de degradación acelerada.*
T'_L = *Vida de la estructura en caso de proceso de degradación acelerada.*
T_L = *Vida de la estructura en caso de proceso de degradación natural.*
ΔR_i = *Incremento de resistencia por efecto de una restauración i-ésima*
T^i_L = *Vida de la estructura relacionada con la restauración i-ésima*
t^* = *Instante presente, en que se produce la evaluación estructural*

Otra hipótesis más pesimista, a la que se ajustan tantos casos conocidos de colapsos tempranos, es la que termina en el punto *D'*. Por alguna razón, colapso parcial, consecuencias de un incendio, ataque químico, etc., en el instante t_D se inicia un proceso anómalo de degradación acelerada de la resistencia. La vida de la estructura alcanza el valor T'_L.

En ninguno de los casos anteriores se llegaría a afrontar la evaluación estructural en el instante t^*. Para que esto ocurra, lo habitual es que los síntomas visibles del deterioro progresivo hayan motivado en sucesivos instantes t_1, t_2, t_3 intervenciones de reparación que habrán restablecido el valor de *R* a niveles similares al inicial. En estos casos,

la vida útil de la estructura alcanzaría los valores T^1_L, T^2_L ó T^3_L en los puntos A, B y C, respectivamente.

En mitad de esta historia, en el instante t^*, se le plantea al técnico la cuestión de la evaluación. La historia de la evolución de $R(t)$ no será conocida, como tampoco la de $S(t)$, sin embargo será preciso, primero, intentar conocer el orden de magnitud de la distancia a que se encuentran, en el momento presente, la solicitación y la resistencia y, en segundo lugar, si se juzga necesario, diseñar una intervención y predecir, con la máxima verosimilitud posible, sus efectos según las direcciones *a, b* ó *c*.

Conviene aclarar un punto: la curva de solicitación S podría ser constante o, eventualmente decreciente en algún periodo, pero lo razonable es pensar que será creciente con el tiempo, en general. Ello se deberá a cambios en el terreno, la construcción de nuevas edificaciones, cambios de uso, aumento de la contaminación ambiental, de vibraciones por el tráfico, etc. Una posibilidad alternativa a la de las curvas de resistencia R incrementada *a, b* ó *c* sería la de disminuir el nivel de solicitación S. Las medidas pueden ser desde alejar el tráfico rodado de la construcción, hasta descargar la estructura confiando su labor resistente a una nueva estructura *oculta* (Puente de Triana en Sevilla).

Las curvas de la figura 3 son esquemáticas y, desgraciadamente, a diferencia de las mostradas en la figura 2 para estructuras nuevas, imposibles de conocer en general. Por ello, el ingeniero debe acercarse al problema con grandes dosis de modestia y con todas las herramientas (no solo de cálculo) que le brindan la técnica y la experiencia disponibles.

Desde este punto de vista, debe proclamarse que la labor del análisis y la intervención, aunque compleja, es abordable. En efecto, en una estructura nueva, la vida útil prevista es de 50 o 100 años. Es en ese periodo en el que se debe garantizar que la probabilidad de fallo estructural sea suficientemente baja. Ante una construcción histórica se podría caer en la tentación de pretender asegurar la estructura *ad aeternum*. La escala del eje de tiempos del esquema indica que la intervención del técnico en el momento presente es un hito más en el proceso de interacción entre la obra y sus constructores y sustentadores, lo que el prof. Mola denomina «un continuo acto de amor».

Por tanto, no debemos hurtarnos la fase más entretenida y compleja dentro de cualquier intervención, que es la de dictaminar cuáles son los problemas que tiene el puente y cuál es el contexto histórico de la intervención.

DIFERENTES TIPOS DE INTERVENCIÓN

Dentro de los diferentes tipos de intervención ya mencionados, en este punto se va a hacer especial hincapié en ciertos aspectos primordiales en las reparaciones y refuerzos de puentes. Dentro de las reparaciones se pueden distinguir dos grandes grupos, las asociadas a problemas durables o de degradación de los materiales empleados en la confección del puente y las reparaciones obligadas por la presencia de daños asociados a un deficiente comportamiento resistente.

Para poder prescribir con acierto las reparaciones del primer grupo es necesario conocer de primera mano los procesos asociados a una deficiente durabilidad, por lo que es necesario profundizar tanto en las propiedades petrológicas de las fábricas como en

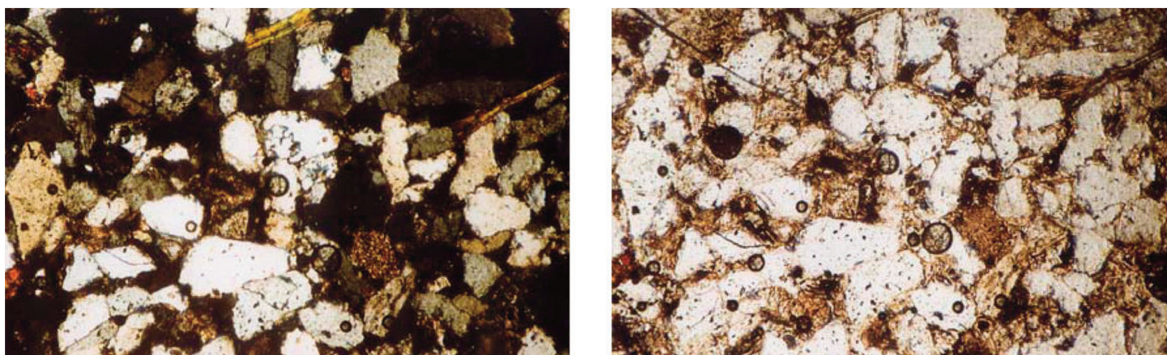


FIG. 4 Vista de una lámina de arenisca bajo el microscopio petrográfico.

las acciones durables, climáticas y contaminantes que actúan de manera continuada sobre nuestros puentes.

En ese sentido la mayor parte de los daños detectados en los puentes de fábrica existentes en la actualidad están ligados a procesos de degradación durable, por lo que el conocimiento de las propiedades hídricas de las rocas o fábricas de ladrillo, de la presencia de sales en el entorno o en el agua, de la constitución y texturas de las fábricas se antoja como imprescindible para poder diagnosticar el problema con precisión y poder prescribir una terapia acertada.

Es cada vez más habitual llevar a cabo ensayos de los llamados durables (microscopía óptica, medida de sales y humedades, envejecimiento acelerado, porosidad, etc.) sobre las fábricas, en lugar de llevar a cabo ensayos mecánicos que muchas veces apenas aportan información. La caracterización de los materiales pertenecientes a estos puentes se debe centrar en otro tipo de propiedades que no son las mecánicas, el peculiar comportamiento de estas estructuras junto a los nuevos criterios que se están estableciendo para evaluar el comportamiento resistente de estas estructuras hace que variables como la resistencia a compresión carezcan de demasiado interés salvo en algunos casos.

Las reparaciones tienen un eminente carácter paliativo, pero la intervención debe de llevar consigo actuaciones preventivas, especialmente si estamos hablando de problemas durables. En definitiva, se debe de aprovechar la intervención para corregir los problemas detectados pero hay que estudiar también cómo estabilizar los procesos durables que se encuentran en marcha para no tener que llevar a cabo futuras reparaciones.

Este aspecto es de vital importancia, ya que si bien es verdad que estas estructuras han demostrado a lo largo de su historia un poder de adaptación a un nuevo contexto sin igual, se debe adoptar una política de mantenimiento activa si queremos conservarlas en el futuro.

Por otra parte, las reparaciones centradas en problemas resistentes deben de ir acompañadas, como ya se ha dicho, de una evaluación certera del mecanismo resistente que ha fallado. Es obligado reconocer que es aquí donde a veces el técnico toma atajos durante el análisis debido a la complejidad del mecanismo mecánico-geotécnico de estas estructuras. La diagnosis del problema debe de pasar por una evaluación sincera de la estructura que acabe con una explicación creíble de los daños que incluya un contraste entre los resultados de las campañas de auscultación y monitorización, los resultados de los modelos numéricos y del resto de estudios y análisis realizados.

En los últimos 30 o 40 años se han desarrollado numerosos estudios que tratan de analizar el funcionamiento resistente de estos puentes desde una perspectiva moderna. Estos análisis se han centrado en todo tipo de aspectos, modos de fallo o colapso, caracterización de los materiales, interacción entre los diferentes elementos del puente (bóveda, relleno, tímpanos, etc.), comportamiento longitudinal y transversal, catalogación de daños, importancia del esviaje en las bóvedas, bóvedas de diferente aparejo, etc.. Muchos de estos estudios, por no decir casi todos, se han centrado en el comportamiento de estas estructuras en agotamiento, es decir, próximas al colapso y, hoy en día, se puede decir que existe un consenso entre la comunidad científica de cómo y bajo qué cargas, de manera bastante aproximada, estas estructuras colapsan.

El problema ha surgido al detectar que muchos de estos puentes pertenecientes a diferentes administraciones de nuestro entorno y que se encuentran actualmente en servicio, aun arrojando resultados aceptables bajo un análisis en agotamiento (en ELU), presentan numerosos daños de los llamados resistentes que requieren de reparación/refuerzo. La explicación de esta convivencia de daños presentes y resultados aceptables en el análisis en agotamiento se encuentra en que el comportamiento de estas estructuras en agotamiento, gracias a su gran régimen post-crítico, se encuentra muy alejado de lo que podríamos llamar un comportamiento en servicio adecuado.

En definitiva, que aunque en un análisis de la capacidad de un puente en concreto se obtengan coeficientes de seguridad muy altos frente al agotamiento esto no permite asegurar que el puente no vaya a presentar ciertos daños, que podíamos denominar «daños de servicio». Estos daños no van a desencadenar el colapso de la estructura, pero están anunciando un cambio en las condiciones originales de trabajo del puente y facilitan que se desarrollen otros procesos asociados a la durabilidad que aceleran y acrecientan el deterioro general del puente acortando su vida útil.

Un ejemplo de estos daños son las frecuentes grietas que se producen entre los tímpanos y las bóvedas, generalmente por la diferente rigidez entre estos elementos. Estas grietas se encuentran presentes en casi el 30 % de nuestros puentes en servicio y, aun no sabiendo con exactitud su origen y su incidencia estructural, podríamos decir que estamos acostumbrados a convivir con ellas. No hace falta señalar que esta convivencia ignorante es peligrosa, ya que normaliza un fenómeno desconocido.

En estos casos, para poder prescribir una reparación acertada se debe de realizar un estudio del comportamiento del puente ante las cargas de trabajo habituales, es decir, un análisis del comportamiento del puente ante las cargas de servicio.



FIG. 5 Grieta entre tímpano y bóveda donde se ha formado un témpano de hielo.

Por último, las actuaciones encaminadas a reforzar el puente solo se deben llevar a cabo cuando se tiene constancia de que la capacidad de una estructura es insuficiente para resistir las cargas a las que está o va a estar sometida. En este sentido, en los puentes existentes como los que nos ocupan, se debe de tener clara la estrategia estructural del refuerzo, por ejemplo, si el refuerzo debe de ser capaz de resistir todas las sobrecargas y dejamos a la estructura existente solo para las cargas muertas o, por el contrario, que se materialice un refuerzo compatible con la estructura existente de tal manera que la nueva estructura actúe conjuntamente frente a la totalidad de las cargas, etc.

Además, si se lleva a cabo un refuerzo de algún elemento en particular se debe estudiar en profundidad su relación con el resto de elementos que quedan sin reforzar.

UN EJEMPLO DE REPARACIÓN Y REFUERZO

En la línea ferroviaria Zaragoza-Alsasua se detectaron un conjunto de pasos inferiores que presentaban un gran número de daños tanto resistentes como durables. Estos daños se habían detectado desde hacía ya tiempo, pero las últimas inspecciones indicaban que se habían intensificado notablemente.

Los daños más preocupantes eran unas grietas localizadas entre los tímpanos y la bóveda cuya abertura era centimétrica, por donde se filtraba el agua lavando los finos del relleno interior. Además de estos daños se había detectado toda una batería de problemas durables en el puente asociados a la circulación y filtración del agua y sus efectos.

Estas grietas anunciaban un mal comportamiento resistente, seguramente provocadas porque recientemente se había aumentado la carga por eje en la línea debido a la circulación de trenes de mercancías.

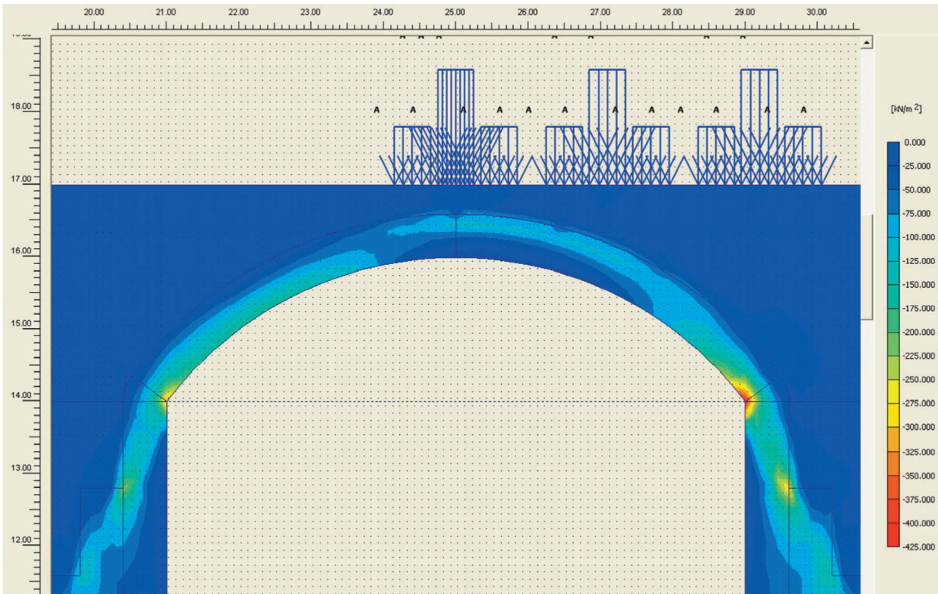
En un principio se llevaron a cabo una serie de análisis en agotamiento de las estructuras, evaluando cuál era la seguridad de las mismas ante las nuevas cargas (ELU), los resultados que se obtenían eran satisfactorios, es decir, aparentemente las estructuras eran capaces de soportar este aumento de cargas con una seguridad adecuada.



FIG. 6 Daños principales en un puente de la línea ferroviaria Zaragoza-Alsasua y detalle de una de las grietas infructuosamente sellada con poliestireno expandido.

Posteriormente se llevaron a cabo un conjunto de análisis de las estructuras bajo las cargas reales de tráfico sin mayorar donde se analizaron aspectos relacionados con el comportamiento en servicios de la estructura. De estos análisis se pudo concluir que bajo la circulación de las cargas sin mayorar se podía producir una concentración de tensiones importante en las uniones entre bóvedas y tímpanos en función de la relación de rigideces entre bóveda y rellenos.

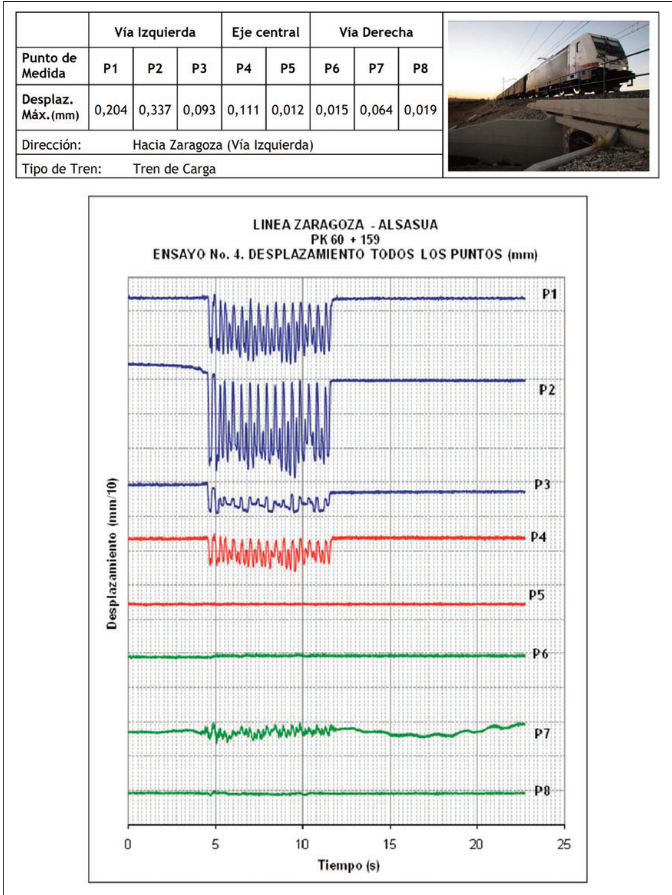
FIG. 7 Análisis en servicio de una de las estructuras. Modelo no lineal donde se analizaron diferentes propiedades constitutivas para la fábrica y para los rellenos.



Además, se llevó a cabo una campaña de monitorización de la estructura bajo las cargas de tráfico existentes (pasajeros y mercancías), donde se pudo comprobar una deformabilidad excesiva de la estructura para cargas de servicio.

Finalmente se concluyó que el relleno granular interior había ido perdiendo compacidad y consistencia, en parte por el lavado de finos que el agua había estado produciendo a lo largo de los años. Este hecho había derivado en una mala interacción relleno/bóveda, una pérdida de rigidez del conjunto y la aparición de grietas de compatibilidad entre la bóveda y los tímpanos (mucho más rígidos). Por otra parte, el aumento de cargas producido había acelerado y acrecentado el proceso.

La solución adoptada para la reparación y refuerzo en este caso fue la de rigidizar el relleno granular mediante inyección. En contra de lo que es práctica habitual, se decidió no coser tímpanos y bóveda y no reparar/reforzar la bóveda sino que se optó por rigidizar el relleno.



	Vía Izquierda			Eje central		Vía Derecha		
Punto de Medida	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Desplaz. Máx.(mm)	0,204	0,337	0,093	0,111	0,012	0,015	0,064	0,019
Dirección:	Hacia Zaragoza (Vía Izquierda)							
Tipo de Tren:	Tren de Carga							

FIG. 8 Imagen y resultados de la prueba de carga realizada una vez cementados los rellenos.

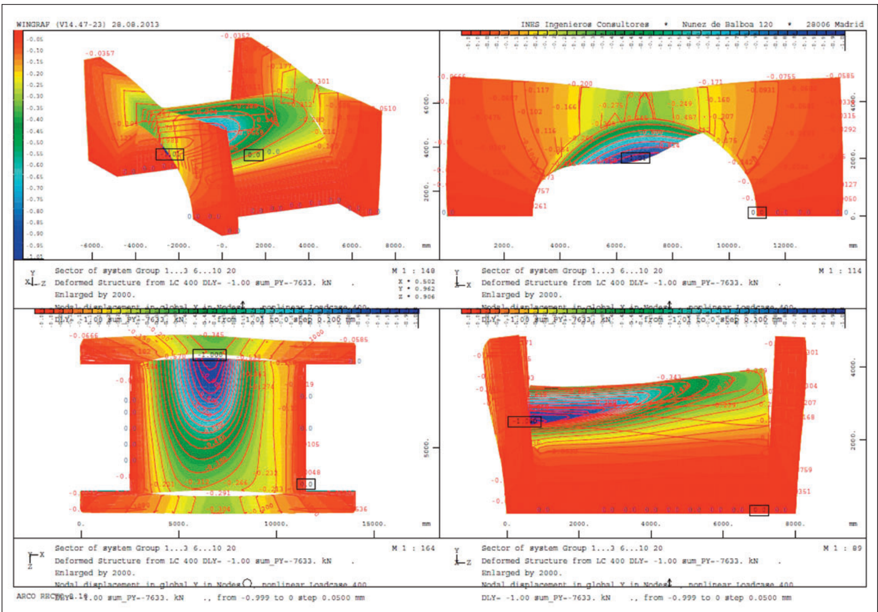


FIG. 9 Imagen de los resultados obtenidos con el modelo numérico una vez cementado el relleno pero con las grietas selladas. Para mejor visión de la deformada de la bóveda se ha retirado el relleno del modelo.

Se realizó un análisis numérico del comportamiento de la nueva estructura con el relleno cementado pero con las grietas selladas que no cosidas y se repitió la prueba de carga ante el mismo tipo de circulaciones.

Los resultados obtenidos en la prueba de carga corroboraron los análisis numéricos, además se pudo comprobar que la deformabilidad del conjunto disminuyo un 80 %.

Por último resaltar que para evaluar bien el material de inyección óptimo se llevó a cabo una serie de sondeos a rotación desde la plataforma para conocer con exactitud la composición y granulometría del relleno granular. Finalmente, se tomó la decisión de inyectar dos tipos de materiales, en primer lugar una lechada de cal para rellenar los huecos mayores y, posteriormente, una resina acrílica para impregnar los poros más pequeños e intentar impermeabilizar el tablero.

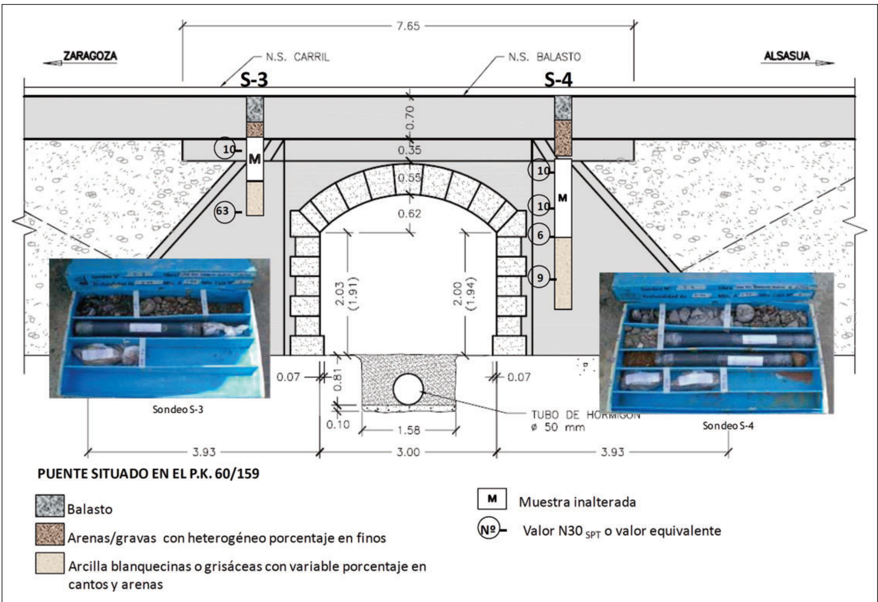


FIG. 10 Composición interna de los rellenos de uno de los puentes caracterizados a través de los ensayos geotécnicos realizados.

Volver al índice

13
Mecanismos de deterioro de los puentes de piedra o ladrillo

JOSÉ MARÍA GARCÍA DE MIGUEL
Dr. Ingeniero de Minas
Catedrático de Petrología y Mineralogía de la ETSI de Minas y Energía. UPM

INTRODUCCIÓN

Ante un fenómeno de deterioro la primera pregunta debe dirigirse a las causas. Estas causas generan procesos de degradación que se traducen en lesiones.

Con frecuencia, sin embargo, la atención se fija en las lesiones y su reparación, lo que lleva a actuaciones inadecuadas que no logran detener daños futuros o incluso los agravan.

Las causas se encuentran a menudo en el intemperismo o en fallos constructivos para hacer frente al mismo, sean por mal diseño original, sean generados por procesos de degradación tras la construcción, sean por restauraciones mal enfocadas.

Es imposible actuar frente al intemperismo, pero se pueden corregir las patologías constructivas y establecer medidas para detener los procesos de deterioro. Solamente una vez logrado este objetivo es posible afrontar la restauración de las lesiones con éxito.

Entre los procesos más frecuentes aparecen la capilaridad ascendente o lateral desde las tierras de acompañamiento, las escorrentías sobre las fachadas y las filtraciones a través de tableros con impermeabilización defectuosa.

Las escorrentías sobre fachadas son fáciles de abordar; no ocurre lo mismo con las otras dos causas. La capilaridad ascendente se puede paliar con drenajes perimetrales, pero corregir la lateral es mucho más complicado; la única medida consiste en inyecciones en el terreno de diversas sustancias, que no siempre dan los resultados esperados.

La impermeabilización del tablero puede ser sencilla en algunos casos y sumamente complicada en otros. Esto sucede cuando, como ocurre en la red ferroviaria, por el puente circulan tráficos con un horario que no se puede alterar. Se están ensayando distintos procedimientos a partir de inyecciones para impermeabilización al trasdós de las bóvedas o bajo el tablero, pero hasta ahora sin resultados concluyentes.

A los procesos anteriores hay que añadir los inducidos por intervenciones desafortunadas. Un ejemplo es la introducción de elementos de hierro y cemento portland. Estos materiales añaden patologías a las originales. El hierro se oxida y expande y el portland aporta sales dañinas para los materiales tradicionales de construcción, manteniendo un elevado coeficiente de dilatación térmica y una alta resistencia mecánica, que desplazan las tensiones a la piedra.

CAPILARIDAD

La molécula de agua es polar, es decir, aunque en conjunto es neutra, el centro de gravedad de las cargas positivas no coincide con el de las negativas. Al mismo tiempo, también es polar la superficie de los minerales que integran la piedra y el ladrillo. Existe, por consiguiente, atracción electrostática entre la parte positiva de las moléculas de agua y la carga negativa de la superficie del material. Esta es la razón por la que se forma un menisco en los bordes de un vaso parcialmente lleno de agua. Si el vaso fuera de un diámetro de micras ambos meniscos se juntarían y las moléculas de agua treparían por las paredes hacia arriba hasta que el peso de la columna así formada equilibrara la fuerza de atracción electrostática. Este peso, a su vez, depende del diámetro del capilar. Pues bien, la piedra y el ladrillo mantienen porosidad en el rango capilar.

El problema es que este agua ascendente desde el terreno o que percola lateralmente desde los terrenos de acompañamiento, lleva sales en disolución. Dichas sales pueden tener muchas causas. Pueden ser inherentes a la piedra (si son materiales evaporíticos como los yesos), o pueden encontrarse en el terreno. Los seres vivos, como las plantas, cuando mueren y se descomponen liberan sales.

Pueden ser de tres tipos: cloruros, nitratos o sulfatos. Los cloruros proceden de materia orgánica, aerosoles o freáticos marinos, portland, áridos, evaporitas, tratamientos antiheladas, etc. Se reconocen por su sabor salado (la sal de cocina es cloruro sódico) aunque existe un reactivo a base de nitrato de plata con cloruro de potasio para identificarlos.

Los sulfatos pueden proceder de elementos de hormigón que llevan portland, áridos o aguas selenitosas, materiales evaporíticos en la construcción, etc. Entre ellos, el sulfato cálcico es insípido, el sulfato de magnesio tiene un sabor amargo y el sulfato sódico ligeramente salado. Se identifican disolviendo en ácido clorhídrico diluido y agregando una gota de cloruro de bario en disolución. Se formará un precipitado insoluble de sulfato de bario.

Cuando el agua capilar aflora en los muros y se evapora, las sales cristalizan. Si lo hacen en la superficie se forman eflorescencias blancas, pero si la evaporación es más intensa y se produce bajo la superficie, en la porosidad de la piedra se generan daños. Estos son la consecuencia de la formación de los cristales de sal en los poros. Si estos son de tamaño capilar, el cristal en su crecimiento alcanza la pared opuesta del poro y la atraviesa. La piedra se areniza e hincha; se pueden formar microfisuras por la expansión.

En la capilaridad ascendente, por debajo de la zona de evaporación la piedra está húmeda pero no aparecen estos daños, simplemente se pueden formar biocolonias o también alteraciones menores derivadas de la hidrólisis de los minerales o la disolución de los mismos.

Aunque teóricamente pueden existir muchos tipos de sales, las más frecuentes, aparte de los nitratos de sodio y potasio, son el sulfato cálcico, el cloruro sódico y los sulfatos de sodio y magnesio. Otras sales, presentes en origen, reaccionan entre sí para generar las que se han descrito.

La agresividad del ataque salino está en función de su solubilidad. El sulfato cálcico es muy poco soluble y agresivo, mientras que los nitratos lo son en gran medida. Los sulfatos de sodio y magnesio contienen varias moléculas de agua en su estructura. En tiempo húmedo pueden almacenar más moléculas de agua, que pueden perder en tiempo seco. Este fenómeno implica cambios volumétricos que se suman a los daños producidos por la propia cristalización.



FIG. 1 Revoco con portland en un puente de la línea ferroviaria Córdoba-Málaga. El revoco se ha desprendido y simula un rejuntado en muchas zonas. La impermeabilidad del portland transfiere las lesiones a la piedra anulando su función sacrificial. Las juntas quedan resaltando por la erosión de la piedra.

Las sales más solubles, como ciertos nitratos y cloruros, tienen tal afinidad por el agua que son capaces de disolverse en la humedad ambiente; se denominan sales delicuescentes. Con dichos cambios de humedad y temperatura pueden disolverse y cristalizar en los poros de la piedra repetidamente, generando mayores daños. Por eso es preciso extraerlas, aun cuando se haya logrado detener la causa que, en un principio, las originó.

Las heladas producen efectos parecidos a los de las sales. En este caso son los cristales de hielo los que se forman en los poros en lugar de cristales de sal. Es un mito que el agua al congelarse se dilata y por ello rompe la porosidad. Experimentos muy meticulosos con líquidos, como el nitrobenceno, que contrae al congelarse, muestran los mismos resultados que se obtienen por congelación del agua. Las temperaturas a temer son las que se encuentran por debajo de -3 ºC. Aunque el agua congela a cero grados, siempre lleva disueltas sales que hacen descender algo el punto de congelación.

Los materiales responden distintamente al ataque por sales. Los poco porosos, como los granitos, tardan mucho en ser afectados, mientras que ladrillos y areniscas son afectados mas rápidamente por contener porosidad en tamaño capilar. Pero sería erróneo concluir que los más porosos son los más sensibles. Depende, más bien, de la porosidad capilar que contengan. Piedras muy porosas, como los travertinos, son poco afectadas ya que la porosidad es de un diámetro amplio y los cristales de sal simplemente tapizan los poros sin causar daños.

En esto se basan los morteros antisales, que se aplican cuando es imposible detener la causa de las humedades. Estos morteros contienen una capa de granulometría muy gruesa que produce grandes poros. En esta capa la humedad se evapora y las sales cristalizan sin generar daños.

En piedras muy compactas, el ataque salino puede abrir una red de microfisuras, originalmente presentes pero selladas por contenido mineral. Estas microfisuras siempre

contienen espacios vacíos, o espacios rellenos, por ejemplo, por material arcilloso, que con el tiempo y el agua se leviga y desaparece. Es en los espacios vacíos de las fisuras donde crecen los cristales de sal o hielo abriéndolas y generando nuevos espacios vacíos, con lo que el ataque sigue un patrón exponencial. Se inicia muy lentamente pero luego progresa con mayor rapidez cada vez.

Para evitar el ataque salino hay que procurar detener la causa de las humedades. Una vez que se ha detenido, hay que extraer las sales mediante apósitos de material absorbente empapados en agua destilada que se aplican sobre la superficie pétrea. El agua del apósito entra en los poros y disuelve las sales. Cuando el agua se evapora en el apósito las sales cristalizan en el mismo. Al retirar el apósito también se retiran las sales que se han depositado en él.

El sulfato cálcico es poco soluble y difícil de retirar, por ello, cuando se detectan sulfatos se rocía, previamente a la extracción, con una disolución acuosa de cloruro de bario. El cloruro de bario reacciona con los sulfatos, generando sulfato de bario, insoluble y por consiguiente, inerte. Los sulfatos de calcio, sodio y magnesio se han transformado en los cloruros correspondientes, muy solubles y fáciles de extraer.

Para saber dónde hay que retirar las sales se puede acudir a efectuar medidas rápidas del contenido salino en puntos aleatorios de la zona a estudiar. Estos puntos se transforman en gabinete en una malla cuadrada por extrapolación a partir de la que se puede confeccionar una cartografía de isopacas.

FILTRACIONES

Las filtraciones se producen cuando el tablero no se ha impermeabilizado. Tradicionalmente se extendía una capa de arcilla con este objeto, pero es un hecho que bastantes puentes construidos en el pasado siglo carecen de esta protección.

Algunos puentes de la red ferroviaria que, por exigencias de un nuevo trazado, se iban a demoler, han permitido conocer su estructura interna. En los casos analizados, sobre los arcos y en el interior de los pilares de fábrica, cuando son muy gruesos, se ha colocado un relleno de cal y canto. Entre dicho relleno y el tablero, se dispone otro relleno que se conoce como «relleno granular». Dicho relleno granular está constituido por tierras locales, así que la impermeabilidad de la estructura depende de la naturaleza de estas tierras, fundamentalmente de su contenido en arcilla.

Las filtraciones que penetran a través del tablero alcanzan los arcos y bóvedas. Si, como es el caso más frecuente, la fábrica representa una barrera hídrica, el agua resbala por el trasdós hacia los riñones, donde se acumula y poco a poco va filtrando hacia el interior de las bóvedas, lo que produce biocolonias, acumulaciones salinas y concreciones en esa zona.

Las concreciones de carbonato cálcico resultan de la disolución de los morteros de cal, de relleno o argamasa. El agua infiltrada de lluvia ha disuelto anhídrido carbónico de la atmósfera, con lo que adquiere un carácter ligeramente ácido debido a la formación de ácido carbónico. Su pH puede alcanzar 5,5 frente al pH 7 del agua neutra.

La acidez del agua permite que disuelva los carbonatos de calcio ($CaCO_3$) transformándolos en bicarbonato ($Ca(HCO_3)_2$) soluble. Cuando el agua aflora en el intradós de



FIG. 2 Puente de caliza en la línea ferroviaria Córdoba-Málaga. La piedra solo presenta una ligera disolución superficial por el agua de las precipitaciones.



FIG. 3 Intradós de uno de los arcos del mismo puente de la figura 2 que muestra filtraciones de agua a nivel de los riñones.

las bóvedas, desprende el anhídrido carbónico disuelto, con lo que el bicarbonato se transforma en carbonato soluble. Ello da lugar a concreciones a partir de las juntas, a veces verdaderas estalactitas.

El problema adicional es que se va perdiendo el mortero de las juntas. Si la estereotomía de la piedra es buena, ello no representa un gran problema, pero si la junta es demasiado ancha e irregular para disimular los defectos de estereotomía, las piezas de la bóveda se reajustan pudiendo crear asientos diferenciales y/o descuelgue de dovelas. Los asientos diferenciales llegan a fracturar las piezas por concentración de esfuerzos en los puntos de contacto, provocando el desprendimiento de fragmentos.

Para corregir esta patología se suelen practicar drenajes en los riñones para dar salida al agua. Esta medida, sin embargo, si bien se puede considerar acertada, la mayor parte de las veces es insuficiente y el proceso continúa, aunque ralentizado en mayor o menor medida dependiendo del número de drenajes y el acierto en su ubicación.

Cuando la fábrica de la bóveda es más permeable que el relleno, las humedades aparecen, más bien, en la clave de la bóveda en lugar de en los riñones, por ser ese el punto más próximo al tablero por donde la humedad se está infiltrando.

Las humedades en la clave, sin embargo, suelen tener otra causa. La pérdida de juntas o el propio reajuste de la estructura por asentamiento una vez que entra en carga, a lo que se suma el impacto dinámico del tránsito, puede abrir grietas axiales según la clave. Es a través de estas grietas por donde se produce el drenaje preferentemente. La propia circulación de la humedad va abriendo las grietas incrementando la lesión.

En ambos casos, afloren filtraciones a nivel de los riñones o a través de la clave, a veces se ha aplicado una capa de espesor decimétrico de hormigón en el intradós, confiando en que la impermeabilidad de este material detuviese las humedades. Esta no es, sin embargo, una buena solución. El hormigón contiene pequeñas fisuras, apenas perceptibles, que el agua termina abriendo al no tener salida, o rezuma por los tímpanos o los pilones.

La solución es, una vez más, la impermeabilización del tablero, pero como se ha explicado esta solución no siempre es sencilla de aplicar.

ESCORRENTÍAS

La mala canalización del agua sobre la estructura es causa de daños. Esta mala canalización se puede deber a un mal diseño original o a patologías que se han ido produciendo a la largo del tiempo y que no han sido corregidas.

Los procesos que se originan por las escorrentías son varios:

– El agua de las precipitaciones puede disolver los carbonatos de la propia piedra si se trata de areniscas con cemento calcáreo o calizas, como ya se ha explicado al tratar las filtraciones. La pérdida del mortero de juntas en cornisas y salientes provoca, a su vez, la canalización del agua hacia esas zonas y la generación de líneas de escorrentía verticales. En los granitos, el agua ácida de las precipitaciones provoca la hidrólisis de los feldespatos y su transformación en minerales arcillosos. El resultado es un conjunto de granos de cuarzo y laminillas de mica en una pasta levigable que termina por desprenderse, es decir, la piedra se areniza.
– Las gotas de lluvia al caer producen un impacto físico sobre la piedra, que desprende granos poco adheridos por los procesos químicos a que se refiere el párrafo anterior. Además, la presión ejercida por el propio impacto provoca que el agua se introduzca en la porosidad de la piedra a favor de la afinidad electrostática de la molécula de agua, con naturaleza polar, por los minerales de ella. La presión hidrostática es equivalente a la ejercida por una columna de agua de unos 10 cm. Una vez introducida, el agua actúa según los mecanismos químicos, ataque por sales y heladas que ya se han descrito. La capacidad de penetración depende indudablemente de la porosidad de la piedra. Los daños producidos dependen, a su vez, del tamaño del poro, siendo más sensible la piedra con porosidad de tamaño capilar.
– De forma física muy parecida actúan las partículas arrastradas por el viento. En los climas áridos llegan a producir alveolos y tafonis importantes en la piedra.

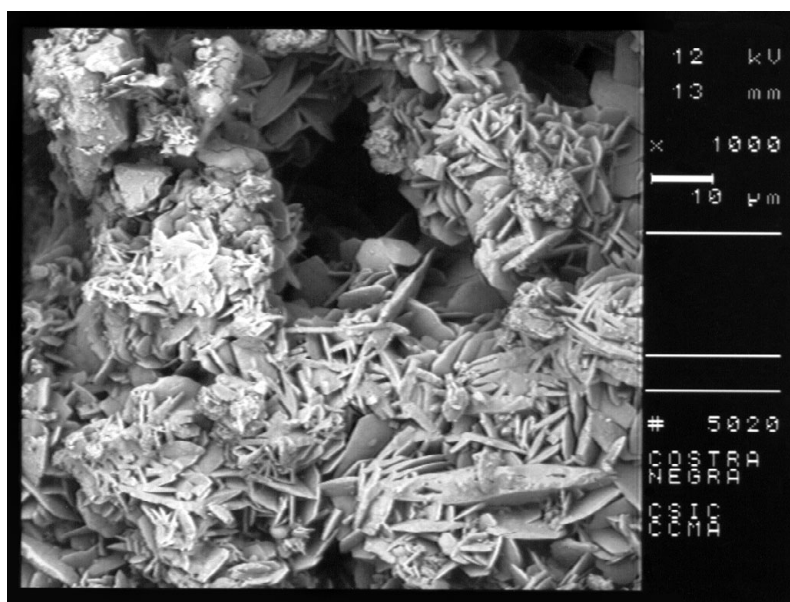


FIG. 4 Rosa de yeso en un poro de arenisca vista al microscopio electrónico de barrido.



FIG. 5 Grieta axial en una bóveda de ladrillo esviada en el puente de la red ferroviaria a su paso por Rubí (Barcelona). La falta de impermeabilización del tablero o la fractura de la misma está provocando la filtración de aguas acompañadas de sales con las correspondientes lesiones en los materiales.

– La propia escorrentía representa un flujo capaz de arrastrar materiales sueltos sobre la piedra que se depositan en las zonas de remanso. En estos lugares, además, se acumulan las sales al evaporarse el agua. De esta manera, en las zonas expuestas de las cornisas y salientes se va perdiendo relieve, los detritos se lavan por la escorrentía y en las partes abrigadas, como bajo esos elementos de la topografía, crecen biocolonias, se acumulan las sales y también son más sensibles a las heladas al permanecer húmedas más tiempo.

La solución es canalizar adecuadamente la escorrentía para retirar las aguas de los frentes. Puede ser también conveniente hidrofugar el material para que desde los salientes el agua descienda directamente al terreno y no se produzca retorno del agua contra el paramento debido a la tensión superficial del agua. En este caso, hay que tener en cuenta que habrá que reponer el tratamiento cada cierto período de tiempo que, dependiendo del hidrofugante utilizado, se suele ser cada 10 años.



FIG. 6 Estalactita producida por la filtración del agua desde el tablero del puente sin impermeabilizar. El agua disuelve el carbonato de las cales de los morteros y rellenos y las precipita al aflorar. A mayor distancia de la grieta se depositan las sales solubles más móviles, generando eflorescencias.

PATOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE CADA MATERIAL

Piedra arenisca

Las areniscas son arenas cementadas. Los granos están formados fundamentalmente por cuarzo, aunque normalmente se acompañan de micas y feldespatos. En la variedad denominada calcarenita aparecen muchos granos de caliza. El cemento suele ser carbonato, generalmente calcita, pero dependiendo de la variedad puede consistir en óxido de hierro, sílice y aun fosfatos. Además, las areniscas contienen una fracción más o menos importante de matriz arcillosa.

Los procesos que las afectan son la disolución del cemento (más sensibles las que tienen cemento carbonatado), que libera los granos, y el levigado de la fracción arcillosa.

Las arcillas son minerales laminares donde cada lámina mantiene una alta superficie específica debido a su morfología. Esta superficie está polarizada como consecuencia de que los cationes se disponen hacia el interior de la estructura, mientras que en la parte externa se ubican los oxígenos con carga negativa. Las laminillas se encuentran unidas entre sí por débiles cargas residuales conocidas como enlace de Van der Waals.

La molécula polar del agua tiene la capacidad de introducirse entre las laminillas y adherirse a la superficie por su parte positiva, formando una capa orientada, de esta forma las laminillas se separan. Dada la orientación de la capa de moléculas de agua, nuevas moléculas pueden entrar formado capas sucesivas hasta que las laminillas pierden toda la coherencia entre sí. A este mecanismo obedece la formación de barro que se puede moldear, para finalmente, al agregar agua en exceso, formarse una suspensión marrón, donde las laminillas están sueltas.

Si este proceso ocurre en el seno de una arenisca con una importante fracción arcillosa, la roca en su conjunto se desintegra. Por ello muchas areniscas resultan tan afectadas por la escorrentía.



FIG. 7 La falta de estereotomía en las piezas de clave de la bóveda provoca descuelgues de dovelas en el interior de la bóveda carpanel (parte inferior-derecha de la fotografía. Puente de la red ferroviaria cercano a Villaescusa de las Torres (Palencia).



FIG. 8 Detalle de los riñones del mismo puente donde se aprecian la grietas en las dovelas producidas por la carga estática más los esfuerzos dinámicos debidos al tránsito de convoyes. En parte se deben a la pérdida de mortero y la concentración de esfuerzos en ciertos puntos. También han contribuido al descuelgue de dovelas que se aprecia en la figura 7.



FIG. 9 Descuelgue de dovelas en un puente de la red ferroviaria en la ciudad de Valladolid, provocado por la mala estereotomía de la piedra. En este caso la mala estereotomía se ha corregido con juntas anchas de mortero. Al lavarse el mortero por el agua procedente del tablero, la falta de sujeción lateral provoca el descuelgue.

Otro proceso en areniscas es la sobrecementación superficial. Dice Vitruvio que la piedra de construcción debería se blanda y encostrada en las caras. Los canteros de la piedra arenisca de la salmantina Villamayor afirman que esta piedra es blanda en cantera y se puede cortar y labrar, mientras que, puesta en obra, pierde la humedad de cantera y se endurece.

Cuando una arenisca, en cantera, tiene cemento calcáreo, el agua que ocupa sus poros está saturada en bicarbonato cálcico. Puesta en obra el agua se va evaporando en las caras y precipitando como carbonato cálcico. Ello produce una sobrecementación y endurecimiento superficial. En principio este proceso es deseable.

El problema surge cuando existe una circulación permanente de humedad por entrada de agua desde el tablero o por otra causa. La piedra sufre entonces una cementación muy intensa cerca de la su-



FIG. 10 Dovela desprendida por un proceso oculto en un puente de la red ferroviaria cercano a Aguilar de Campoo. Se trata de una arenisca donde la percolación del agua desde el tablero ha provocado la disolución interna del cemento de los granos y su precipitación en la capa superficial, endureciéndola y aparentando buen estado de la piedra. En la dovela desprendida se observa la capa labrada externa perfectamente conservada, mientras que internamente la piedra ha perdido su forma al convertirse en arena.

perficie, mientras se va descementando interiormente. En apariencia la piedra está muy bien, pero en el interior se ha ido debilitando.

Ya se ha descrito cómo este proceso de descementación interna puede llevar al descuelgue y aun al desprendimiento de dovelas y a otros daños.

Para terminar, baste señalar que la arenisca, piedra por otra parte muy utilizada ya que es fácil de labrar y geológicamente frecuente, normalmente es muy sensible a las sales y heladas por contener, generalmente, porosidad en tamaño capilar.

Piedra caliza

Hay muchos tipos de caliza y cada una tiene sus mecanismos específicos, pero todas comparten la facilidad de disolución por el agua ácida de las precipitaciones. Tienden a disolverse en las partes más expuestas, mientras que se pueden formar costras de carbonato en las zonas abrigadas donde el agua remansa y pierde el CO_2. Las superficies alteradas pueden haber perdido volumen pero aparecen duras y consistentes. La arenización no es típica de esta piedra.

No todas la rocas carbonatadas tienen la misma facilidad de disolución; aparte de su textura (cuanto más superficie específica mayor velocidad del proceso) también influye su composición química. Las calizas puras están formadas por carbonato cálcico en forma del mineral calcita, pero esta calcita puede contener más o menos magnesio hasta transformarse en otro mineral, la dolomita. La dolomita, compuesta por carbonato de calcio y magnesio, es mucho menos soluble que la calcita. Las rocas formadas por dolomita se denominan dolomías. Los Alpes Dolomíticos son un ejemplo de que se trata de rocas muy extendidas. Las curiosas formas de la Ciudad Encantada de Cuenca, donde en la parte inferior hay un nivel de caliza y en la superior de dolomía, ilustran este fenómeno.

Las calizas suelen ser menos sensibles que las areniscas a las sales y heladas, ya que o tienen muy poca porosidad (calizas compactas) o esta es muy amplia y las sales y el hielo cristalizan en su interior sin producir daños (travertinos).

Granitos

El único mineral alterable que presentan los granitos es el feldespato. El agua ácida los va transformando en arcillas que debilitan la consistencia de la piedra y la hacen sensible al impacto de la lluvia, el viento, las heladas y las sales. La piedra, típicamente, se areniza. Al pasar la mano se desprenden granos. En las inmediaciones de los paramentos aparece una arena grosera (len) formada por granos del granito alterado, angulosos y heterométricos.

La porosidad del granito es muy baja, menor del 1 % (en una arenisca, por ejemplo, está entre el 10 y el 30 %). A medida que se produce la alteración esta porosidad puede alcanzar el 8 %. Más allá de este valor la roca se encuentra muy descompuesta y se deshace con la presión de la mano. En las estructuras más antiguas ya el granito se encontraba originalmente algo alterado. Los primeros metros a partir de la superficie, lo están, y sin otras fuentes de energía más allá de la animal y la humana, lo normal era extraer los granitos de esta zona superficial en lugar de retirar esta parte y extraer el material de la parte sana más profunda. Además, este granito algo alterado era más fácil de labrar.

Ladrillo

El ladrillo se produce a partir del cocido de arcillas poco expansivas (con una fracción elevada de illita). Se mezcla con agua y se produce una pasta que luego se cuece.

Si la pasta es arcillosa en exceso se produce una materia demasiado grasa que retraerá durante el cocido y se producirán grietas. Por ello, se debe utilizar tierra que no solo contenga arcilla sino también arena y limo en ciertas proporciones.

Para hacer que la pasta no sea demasiado grasa se añaden lo que se denomina desengrasantes. Estos son arena de cuarzo y feldespato y chamota. La chamota es ladrillo machacado procedente de deshechos anteriores del proceso de fabricación.

En el proceso de cocido la temperatura es mayor en la superficie de las piezas que en el interior. Esto conlleva que parte de los minerales lleven a fundir y den consistencia a las piezas; es la capa de vitrificación. En el interior aparece una zona muy porosa, debido a la evaporación del agua de amasado de la pasta, que se denomina bizcocho. La pérdida de la capa vitrificada supone que la pieza queda muy expuesta a la alteración.

La presencia moderada de carbonatos en la pasta es deseable ya que facilita la vitrificación al actuar como fundentes, pero un exceso lleva a producir grumos de cal viva en el seño del ladrillo, que al hidratarse provocan estallidos.

Las patologías de los ladrillos dependen tanto de su composición, como del proceso de fabricación. Un corte defectuoso de las piezas antes del cocido producirá escamas, que se traducen, tras el cocido, en descamaciones y una superficie que se areniza con facilidad, aloja el agua y proporciona zonas de debilidad frente a los agentes agresivos.

Debido a su porosidad, el ladrillo es bastante sensible al ataque de las sales y heladas. No hay que olvidar que las arcillas de partida de los ladrillos, se encuentran, a veces, interestratificadas con materiales evaporíticos y pueden contener sales, si no se ha efectuado un buen control del material usado en su fabricación.

Si se utilizan arcillas excesivamente plásticas, las partículas se orientan por el rozamiento con la hélice de la galletera, quedando las capas de arcilla yuxtapuestas pero no trabadas; y si además contienen sílice inerte se producen exfoliaciones y roturas frágiles en las piezas.

En primer lugar se produce la pérdida de la capa de cocción, con lo que el bizcocho interno queda expuesto. Entonces el proceso progresa con mayor rapidez a partir del núcleo de la pieza que se va transformando en un polvo muy fino. Finalmente, solo queda la capa de cocción contigua al mortero y una profunda oquedad pulverulenta donde se encontraba el bizcocho del ladrillo. Cuando esto ocurre en muchas piezas contiguas se tiene una red de juntas preservadas y entre ellas las oquedades donde estuvieron las piezas. Esta estructura recuerda a un panal de abeja.

REFLEXIONES FINALES

Una vez que la Humanidad ha construido un ingente patrimonio, tanto arquitectónico como en obra civil, uno de los principales problemas que enfrenta la ingeniería para el siglo que se inicia es el de su conservación.

Todas las estructuras tienden a deteriorarse con el tiempo, como consecuencia de la adaptación de los materiales que las componen y su disposición al entorno en que se encuentran ubicadas. El mantenimiento en uso de dichas estructuras el mayor tiempo posible genera importantes costes que es preciso reducir con estrategias y técnicas racionales.

La cinética de los procesos es importante para tomar decisiones; procesos rápidos requieren intervenciones de emergencia, procesos muy lentos requieren valorar el riesgo de actuar frente a los beneficios esperados.

Contra los procesos de degradación se requiere actuar primero sobre las causas y su desarrollo antes de abordar la restauración de las lesiones producidas, de otra forma, en el mejor de los casos, las lesiones volverán a producirse, en el peor, las actuaciones pueden agravar los daños.

El buen conocimiento de los materiales y los procesos de degradación ahorra costes. Puede suponer un gasto adicional en estudios previos, pero un importante ahorro en obra al evitar fallos que implican destrucciones y reconstrucciones o daños futuros.

Volver al índice

14
Experiencias desde la Administración de carreteras. La Rioja

JOSÉ MIGUEL MATEO VALERIO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe del Servicio de Carreteras (Gobierno de La Rioja)

LOS PUENTES EN LA RIOJA

La Rioja es la Comunidad Autónoma más pequeña de la España peninsular. Con poco más de 5.000 km² ocupa un tramo de unos 125 kilómetros de la margen derecha del curso medio-alto del valle del Ebro. Limitada al sur por las sierras del Sistema Ibérico, su orografía se ordena en torno a seis sistemas fluviales principales, que drenan el territorio de sur a norte, desembocando casi ortogonalmente en el río Ebro que la delimita por el norte. Son el Oja-Tirón, el Najerilla, el Iregua, el Leza-Jubera, el Cidacos y el Alhama y en sus riberas y en la del Ebro se sitúan los principales núcleos poblacionales.

Uniendo estos núcleos y discurriendo por el fondo de los valles de los ríos principales, se asienta la parte fundamental de la red de carreteras, formada por los aproximadamente 1.500 kilómetros de la red autonómica, a los que hay que sumar los 350 kilómetros de la red estatal y los 120 de la autopista AP-68.

La red autonómica se organiza a raíz de la declaración del Estatuto de Autonomía de 1982, sumando a las carreteras de la antigua Diputación Provincial de Logroño, la Red Comarcal, las antiguas «C-», cedidas por el Estado y transferidas según decreto de 1984.

En los comienzos de los años 80 la red presenta grandes deficiencias en cuanto a gálibos, trazados y firmes. Con la constitución de la Comunidad Autónoma se emprende un constante proceso de mejora, que solo se interrumpe con el inicio de la crisis actual, y que, entre otros aspectos, lleva a abordar el problema de la modernización de las obras de paso, fundamentalmente sobre nuestros ríos.

Por la época en que se construyen las carreteras autonómicas, principalmente el último tercio del siglo XIX y comienzos del XX, estos pasos son puentes arco de piedra u

hormigón en masa, con luces moderadas, en torno a los 20 metros y directrices de medio punto o rebajadas, escarzanas, carpaneles o elípticas.

También se construyen, excepcionalmente, varios puentes de hierro pudelado forjado, al socaire de la puesta en servicio del ferrocarril Tudela-Bilbao en 1863, con amplia utilización de este tipo de material, y sobre el que se articula el desarrollo de la actual red de carreteras.

INTERVENCIONES EN PUENTES DE FÁBRICA EN LA RIOJA

Por la época en que se construyen, los puentes presentan dos problemas para su adecuación a condiciones razonables: de una parte su escasa anchura, que en muchos casos impide el cruce de dos vehículos ligeros, y, de otra, su trazado; cuando se construyeron primaba la economía de la obra, lo que hacía que fueran ortogonales al cauce con curvas de acceso de radio reducido, inadmisibles para las velocidades actuales, aunque no para las de la época.

Entre los que resultaban acordes con las características de trazado de las carreteras de las que formaban parte, y siempre pensando en su utilización, ya que la experiencia demuestra que los puentes que se abandonan acaban arruinados, el problema consistía en conseguir unas dimensiones suficientes de plataforma.

La primera acción llevada a cabo en la extinta Diputación consistió en desmontar los pretiles y sustituirlos por estrechas barandillas prefabricadas de hormigón armado, colocadas sobre un encintado también de hormigón armado apoyado sobre la imposta y ligeramente volado sobre ella; así entre la diferencia de anchura del peto y la barandilla y el desplazamiento hacia el exterior de su eje, se conseguía una ampliación del orden de un metro en total, escasa pero apreciable.

El siguiente paso, más ambicioso, consistió en la colocación de losas transversales de hormigón armado, superpuestas sobre una torta de regularización de hormigón seco. Las losas se colocaban independientes y, en los extremos, se instalaba una barandilla prefabricada de hormigón o metálica de anchura reducida. Así, con la teoría de que el centro de gravedad de los vehículos cayera dentro de la plataforma del puente, se conseguían ensanches entre uno y un metro y medio a cada lado.

De este tipo es la ampliación del año 1981 del puente de Santurde sobre el río Oja, de finales del siglo XIX, formado por cuatro bóvedas escarzanas de 14 metros de luz, o del puente de Viguera sobre el río Iregua, también de finales del siglo XIX.

Estas ampliaciones se mostraron escasas, ya que no permitían construir aceras, imprescindibles en puentes urbanos o periurbanos para separar el tráfico rodado del peatonal, con anchura suficiente, lo que llevó a plantear ensanches más ambiciosos.

La primera idea era sustituir las losas transversales de hormigón armado por otras pretensadas, solidarizándolas con unas vigas longitudinales de reparto, para así poder hacer voladizos más generosos. Las vigas longitudinales, de medio metro de canto aproximadamente y fuertemente armadas, se colocaban adosadas a los tímpanos, transitando hacia una losa de 20 centímetros de espesor en la zona de clave, en la que, por dimensiones, no cabían. En esta estructura se dejaban unos grupos de barras de anclaje, que



FIG. 1 Puente de Anguciana ampliado.

coincidían con cajetines colocados en las losas de forma que, una vez armados y rellenos con mortero sin retracción, quedaban totalmente solidarizadas. Así se conseguían ensanches del orden de 3 metros a cada lado, que permitían, además de una calzada suficientemente ancha, la ejecución de aceras de un metro y medio y la colocación de los correspondientes pretiles.

De esta tipología es la ampliación del puente de Arnedo sobre el Cidacos, de finales del siglo XIX con seis bóvedas elípticas, de luces próximas a los 20 metros, llevada a cabo en 1991.

Pero la transmisión de cargas a las vigas riostras y su posible afección a la zona de tímpanos, así como las transiciones en la zona de clave, causaba una cierta inquietud y, a pesar de que no se observó ningún tipo de patología en el puente de Arnedo, en las siguientes ampliaciones se utilizó como elemento de arriostramiento entre las losas transversales y reparto de cargas, una losa continua de 40 centímetros de espesor de hormigón armado, colocada entre los tímpanos del puente y reducida a 20 centímetros en las zonas de clave.

El sistema de anclaje de las losas era similar, con esperas y cajetines para una segunda fase; con la losa se conseguía mayor rigidez en el sistema y, sobre todo, un mejor reparto de las cargas transmitidas a la estructura antigua, evitando la concentración de esfuerzos en la zona de tímpanos.

Con este sistema se ampliaron el puente de Anguciana sobre el río Oja, de finales del siglo XIX, con cinco bóvedas escarzanas de 15 metros de luz, ensanchando 3 metros a cada lado en el año 1995 [FIG. 1] y el puente de Murillo sobre el río Jubera, de la misma época y dimensiones similares, con cinco arcos de 17 metros de luz, obra ejecutada en el año 2004.



FIG. 2 Puente de Cervera del Río Alhama ampliado.

Otro tipo de ampliación se llevó a cabo en el puente de Cervera sobre el río Alhama en 1997, con estructura formada por una bóveda elíptica de 20 metros de luz [FIG. 2]. Se trata de un puente urbano que exigía una ampliación asimétrica, por su situación respecto a las calles adyacentes, 1,25 metros en uno de los lados y 3,25 metros en el otro. Se optó por construir una losa, independiente de la bóveda, formada por vigas pretensadas en T invertida, que se apoyaban en unos estribos en forma de π, formados por un dintel que arriostraba dos pilas-pilote de un metro y medio de diámetro y 32 metros de longitud, alojados junto a los extremos del puente original.

En todos los casos se intentó afectar lo menos posible a la estructura antigua, pero inevitablemente fue necesario sustituir los pretiles aunque siempre se respetó la imposta. En casi todas las intervenciones que se han descrito ya se habían perdido los pretiles antiguos. En las que no, se retiraron y almacenaron en el Parque de Obras Públicas de la Comunidad, ya que todas las intervenciones son reversibles, aunque resulta altamente improbable que se lleve a cabo tal reversibilidad. En todo caso se procuró cuidar el acabado de las ampliaciones y, en concreto, impostas y barandillas; lamentablemente resulta imposible diseñar nada con la delicada contundencia de un pretil de sillería[1].

En los últimos tiempos, esta posible controversia parece resuelta, quizá no de la forma más deseable, con las nuevas normativas sobre elementos de contención, que acotan sensiblemente las posibilidades de diseño, cuando no las reducen poco menos que a los PMH (Pretil Metálico Homologado). En carreteras de la Comunidad Autónoma de La Rioja se ha utilizado este tipo de pretiles en el puente de Badarán sobre el Oja, ensanchado con losas apoyadas en costillas transversales de hormigón armado, en el de Haro sobre el Ebro (este de hormigón, de principios del siglo XX) y en varios de menor relieve.

Un caso especial fue la ampliación del puente de Briones sobre el ferrocarril, llevado a cabo en el año 1994[2], en el que, por exigencias de RENFE, fue necesario hacer una estructura independiente, que no afectase a la existente [FIG. 3].

Se trata de un puente de sillería de piedra, de vano único, formado por una bóveda escarzana de 15 metros de luz, realizado en los primeros años del siglo XX. Para ampliarlo se vació el relleno y se construyeron dos estructuras en cantiléver[3] una a cada lado, for-

FIG. 3 Puente de Briones sobre el ferrocarril.



madas por dos cuchillos de canto fuertemente variable, arriostrados entre sí. En los estribos tenían el canto de tímpano, del orden de 4 metros, a un metro de la clave terminaban y su forma se adaptaba a la de la bóveda, de la que estaban separados ligeramente para evitar la transmisión de esfuerzos. En los arranques, la parte delantera estaba apoyada en la roca y la trasera anclada al terreno para conseguir un comportamiento estructural en voladizo.

Sobre estas estructuras se colocaron unas vigas pretensadas ancladas a ellas por el sistema de cajetines rellenos, y cosidas entre sí en forma de cremallera en segunda fase, para conseguir una estructura totalmente monolítica. Además pudimos recuperar los pretiles, que, para conseguir una mejor contención ante posibles accidentes, se cortaron en placas de 20 centímetros de ancho y se adosaron a dos muretes de hormigón armado. El resultado fue apreciable, aunque el coste de la obra solo resultó asumible por la especificidad de la intervención y las escasas dimensiones de la estructura.

Otra intervención, especial, aunque por ahora en proyecto, esperemos que las circunstancias económicas no la aborten, es la ampliación del puente sobre el río Tirón en la localidad de Cihuri. Se trata de un puente de dimensiones modestas, con tres bóvedas escarzanas de 10 metros, de directriz bastante rebajada y arcos equilibrados entre sí (sistema Perronet), con unos almohadones de transmisión de esfuerzos entre los arcos realmente notables, construido a finales del XIX por Amós Salvador Rodrigáñez, sobrino de Práxedes Mateo Sagasta. La ampliación se proyecta vaciando el relleno y construyendo una estructura interior en hormigón armado, pilotada en los estribos, que soporta unas costillas de acero auto-patinado sobre las que se apoya una acera peatonal. Con una ligera ampliación del tablero, los pretiles se recuperan y vuelven a colocar delimitando la calzada y separándola de las aceras, que se rematan con una barandilla metálica peatonal[4].

Pero ampliar puentes no es cosa nueva en nuestra Comunidad, en la que existen ejemplos notables, entre los que cabe citar, con resultados diversos, el de Haro y el de Cuzcurrita, ambos sobre el río Tirón.

El puente de Haro sobre el río Tirón tiene una longitud aproximada de 150 metros, aunque diversas actuaciones han ido cegando parte de sus vanos para aprovechar la te-

rraza del río, y está formado por ocho arcos de medio punto de anchura variable entre 10 y 15 metros de luz, de los que solo los tres de la margen izquierda quedan en uso actualmente. En origen, su anchura era del orden de 5 metros y sus fábricas corresponden a varias épocas entre el siglo XIV y el XVII.

A finales del siglo XIX, concretamente alrededor del año 1880 se llevó a cabo una primera ampliación, coincidiendo con el auge que disfrutó la ciudad de Haro, a raíz de la exportación de vino que, a través de la estación del ferrocarril Tudela-Bilbao inaugurado en 1863, se efectuó a Francia, cuyas viñas habían quedado arrasadas por la plaga de filoxera. Dicha ampliación consistió en adosar una nueva fábrica de piedra de casi 4 metros de anchura, siguiendo la misma secuencia de vanos, aunque con directrices elípticas, acordes con la época.

Por último, a mediados del siglo XX se amplió con una losa de hormigón armado, de 30 centímetros de espesor y 1 metro de voladizo a cada lado, hasta conseguir los 11,5 metros de anchura de plataforma actual.

Menos pretenciosa, pero mucho más delicada, fue la ampliación que Amós Salvador Rodrígáñez llevó a cabo a finales del siglo XIX en el puente de Cuzcurrita. El puente original constaba de cuatro arcos de medio punto, dos de 13 y 12 metros y otros dos de apenas 3 metros que servían de aliviadero en la zona del muro de acompañamiento del estribo izquierdo y que fueron cegados en la intervención del XIX. A los dos arcos principales, de los siglos XV-XVII, se adosaron dos arcos escarzanos de la misma flecha y unos dos metros más de luz, con una anchura que no llega a un metro. También se modificaron los tajamares, espolones y pretiles en una composición francamente notable.

En otros casos, la ampliación de la obra antigua resultaba desaconsejable, bien porque no era asumible la modificación necesaria de trazado para habilitar las curvas de entrada y salida al puente, o bien porque las actuaciones necesarias sobre la fábrica antigua resultaban inadmisibles, o por ambas razones. Así ocurrió en el puente de Arenzana sobre el río Najerilla o en el puente de Arnedillo sobre el río Cidacos, ambos en celosía metálica, en los que se diseñaron variantes con puentes en estructura mixta acero-hormigón, procurando cuidar las formas y luces y, sobre todo, en el caso del puente de San Vicente de La Sonsierra.

LOS CASOS DE SAN VICENTE DE LA SONSIERRA Y BRIÑAS

El puente de San Vicente de la Sonsierra es una soberbia obra realizada en sillería de piedra arenisca. Está situado en la localidad del mismo nombre, sobre el río Ebro, a los pies de una iglesia-castillo-fortaleza medieval, en uno de los parajes más singulares de nuestra Comunidad. Los orígenes son inciertos, pero su situación fue estratégica en el avance del reino de Navarra para la reconquista de los territorios de la actual Rioja y probablemente formó parte del camino que unía Pamplona con Nájera cuando en el siglo X-XI, los monarcas navarros fijaron su residencia y, por tanto, su capital en esta última ciudad. Cuando Castilla se separó de Navarra quedó en la frontera, como lo atestigua el escudo de la villa. Desde entonces las avenidas del río, las múltiples guerras que le han afectado y la energía humana puesta en su reconstrucción, han forjado un auténtico pa-

limpsesto pétreo, en el que se pueden apreciar notables muestras del arte de construir puentes de los últimos seis siglos.

Con 235 metros de longitud (190 sin muros de acompañamiento) y 5,1 metros de anchura media, está formado por nueve arcos, de muy diversa edad, longitud y factura. En su actual configuración, los tres primeros desde la margen izquierda son apuntados, de una rosca y luces próximas a los 10 metros. Probablemente se construyeron a finales del siglo XIV o principios del XV, siendo los más antiguos.

Los tres siguientes son de medio punto y doble rosca y de entre 10 y 12 metros de luz. Su construcción data del siglo XVII. De los otros tres, empezando por la margen derecha, el primero, de medio punto y 14 metros de luz y el segundo carpanel de 29,75 metros de luz se construyeron a mediados del siglo XIX después de varias crecidas que arruinaron el puente en la segunda mitad del siglo XVIII.

Por último el de más luz, elíptico de 36,5 metros y 9 metros de flecha se construyó en los años 80 del siglo XIX después de que la riada de 1871 arruinara la pila intermedia de los dos arcos a los que sustituye.

El paso sobre el puente resultaba penoso, las curvas de acceso eran de radio muy reducido y apenas si permitía el cruce de dos vehículos ligeros. Además, a principios de los años 80 se observó que los sillares de la zona de riñones, de la boquilla de aguas abajo, del arco elíptico, presentaban unas alarmantes fisuras longitudinales, producidas sin duda por efecto Poisson, al sobrepasarse la resistencia a compresión del material. Resultaba difícil deducir la causa. Quizás un asentamiento en la zona del tajamar de la pila adyacente, o quizás un problema de descimbrado, a lo que pudieron sumarse las importantes sobrecargas de uso que la explotación de una planta de hormigón próxima al puente generaba sobre él, ya que los áridos de los que se abastecía se extraían en la otra margen del río. Ante esta situación se limitó, como primera medida, la carga admisible a 12 toneladas y se empezó a trabajar en el diseño y construcción de una nueva obra de paso sobre el río.

En primer lugar se llevó a cabo un Estudio Informativo, en el que se definió la ubicación del puente nuevo, optándose por la solución de ejecutar una reducida variante de la carretera, que situaba el puente nuevo próximo al actual y ligeramente esviado, ya que cualquier otra solución que hubiera separado más las estructuras, conllevaba unos costes inabordables, dejaba San Vicente aislado y acarreaba importantes problemas administrativos, pues el desembarco en la margen izquierda del río se hacía en la vecina Comunidad Autónoma Vasca.

Realizar una estructura nueva, al lado de otra tan venerable, resultaba labor compleja y, después de muchos estudios se optó por el puente actual. Por una parte se quería que sus formas recordaran a los arcos del puente antiguo y por otra que la acumulación de materia fuera la mínima posible.

Así, se diseñó un puente de estructura mixta (con doble acción mixta), en viga continua de canto muy variable (9 metros en apoyos y apenas 1,5 en clave) con directriz circular y 320 metros de longitud total (luces de 45+90+90+45+25+25).

A primera vista parece un puente en arco, pero incluso el funcionamiento como viga resulta relativo, pues la inercia en el centro es tan reducida (la relación canto/luz es de 1/60) que prácticamente trabaja como cantiléver con una rótula en la clave [FIG. 4]. El



FIG. 4
Puente nuevo de San Vicente de la Sonsierra.

puente se terminó en 1998, pero hasta 2015 no se pudo iniciar un proyecto, terminado a finales de 2016, que definiera las actuaciones necesarias para llevar a cabo una restauración integral del puente antiguo[5].

Cabe añadir que, durante la construcción del puente nuevo, se pusieron varios testigos de escayola en la zona de peor aspecto de las fisuras del arco mayor, y que durante estos años se ha realizado un seguimiento, observando que no se ha producido ninguna modificación apreciable y, por tanto, que la patología, una vez liberado el puente del tráfico rodado, no ha dado muestras de progreso.

Pero antes de entrar a definir los detalles del proyecto de rehabilitación del puente, sería conveniente describir las obras que se llevaron a cabo en el año 2009 en el puente de Briñas, también sobre el río Ebro.

El puente de Briñas [FIG. 5] está localizado en el término municipal de Haro, a 2 kilómetros de la población, en la antigua carretera de Logroño a Vitoria, de la que formó parte hasta 1953, cuando se construyó el actual puente de Santo Domingo. Las referencias al puente de Briñas son muy antiguas; documentalmente se retrotraen a 1320, aunque quizás ya estuviera construido en 1187, año de la promulgación del Fuero de Haro en el que se hace referencia indirectamente a los puentes de la ciudad.

En la configuración actual consta de siete arcos de distintas luces y formas, con dimensiones entre 7 y 14 metros, 157 metros de longitud total y fechas probables de construcción entre los siglos XIV y XIX.

El puente, a lo largo de su historia, sufrió innumerables vicisitudes a causa de las riadas del Ebro, de las guerras –siempre fue un puente fortificado– y del abandono a que se vio sometido desde que se inauguró el nuevo puente.

En el momento de abordar su restauración, el puente se encontraba en un estado lastimoso, aunque por suerte, y como se comprobó tanto visualmente como con dos sondeos efectuados en sus pilas más expuestas a la corriente del río, las cimentaciones, directas sobre la roca, estaban en muy buen estado[6].



FIG. 5 Puente de Briñas restaurado.

Las principales patologías que presentaba eran:

– Mellado con desaparición de numerosos sillares en las zonas avanzadas de los tajamares, producidas por el choque de flotantes, árboles principalmente, durante las avenidas del Ebro.
– Degradación muy acusada de los paramentos, con una importante colonización vegetal y una apreciable pérdida de material en los labios de los sillares, a consecuencia de un desafortunado rejuntado con mortero de cemento; incluso algunos sillares, parcialmente desaparecidos, habrían sido «remendados» con trozos de ladrillo recogidos con el mismo mortero.
– Falta de gran parte de los sillares que formaban los pretiles: varios se encontraban en el río y otros, la mayoría, habían desaparecido probablemente para ser reutilizados fuera del puente.
– Además, el puente presentaba filtraciones por deficiencia en el drenaje del tablero, fisuras longitudinales, dislocación de sillares, principalmente en zonas próximas a la coronación en tajamares y espolones, etc.

La restauración se abordó con la idea rectora de llevar a cabo una actuación discreta, basada en la comprensión de que la configuración actual del puente era resultado de múltiples actuaciones, llevadas a cabo a lo largo de su larga existencia y que la nuestra debería limitarse a restañar sus múltiples heridas, procurando devolverle, en lo posible, su esplendor último.

A tal fin se llevó a cabo una topografía de detalle de toda la estructura por escaneo con láser de precisión, que servía además de para caracterizarla, para documentar cada sillar en los que intervendríamos.

Después se realizó un estudio arqueológico, con excavaciones localizadas en el pavimento, para buscar los restos de antiguas torres fuertes y un puente levadizo que, según documentos escritos, se construyó durante las Guerras Carlistas. Además, se hizo un detallado estudio de paramentos, caracterizando los diferentes armados y estereotomía de las fábricas, lo que permitió definir al menos siete fases de construcción desde el siglo XIV hasta el siglo XX.

Estas actuaciones fueron acompañadas por una completa investigación documental, basada en la excelente información recogida en Arrúe y Valgañón, 1998.

Con estas herramientas se definieron las siguientes labores de restauración:

– Recalce de pilas, con bombeo de hormigón en encofrado previamente colocado y reparación de tajamares con sillares según la estereotomía del resto del tajamar; entre el hormigón y la obra de piedra se colocó una lámina de plomo de separación.
– La piedra que se utilizó en los tajamares fue una arenisca de Uncastillo, de características y estereotomía similares a la fábrica antigua, aunque con un acabado superficial diferente, aserrado en vez de apiconado. Así, además de un ahorro importante, se conseguía una clara diferenciación entre la obra nueva y la antigua.
– La siguiente operación consistió en la restauración de paramentos, con eliminación del rejuntado de mortero, saneo de zonas parcheadas y de otras en que los sillares existentes estaban en mal estado, así como limpieza de toda la superficie con chorro de silicato de aluminio.
– Labor importante resultó la elección de mortero; debía permitir la migración del agua, tener baja retracción, una resistencia adecuada y un contenido de aire suficiente para hacer frente a los ciclos de hielo y deshielo, además de un color apropiado.
– Después de numerosas pruebas se optó por un mortero bastardo, cal-cemento blanco en relación 4-1 y con colorantes naturales, al que se añadió un biocida en el agua de amasado.
– La piedra que se utilizó fue de la zona recuperada del río y reutilizada de los elementos de los pretiles más degradados. Una vez acabadas las labores de reparación y rejuntado se aplicó un producto hidrofugante adicionado con biocida en toda la superficie del puente.
– El pavimento se repuso sobre una membrana de impermeabilización y los pretiles se reconstruyeron, según las dimensiones que en cada zona determinó la lectura de paramentos, en piedra de Uncastillo de características similares a la utilizada en los tajamares.

Con la experiencia adquirida en el puente de Briñas, se abordó el proyecto de restauración del puente de San Vicente, en una línea similar, pero con un estudio estructural detallado que, debido a la patología observada en la bóveda siete, fue necesario realizar[7].

En dicha bóveda se observaron defectos muy apreciables: una deformación de su directriz de aproximadamente 10 centímetros, fisuras en la boquilla de aguas arriba, que ocasionan un desportillado muy apreciable en la arista inferior y que suponen que en varios puntos la tensión compresiva ha superado la capacidad resistiva del material, y fractura en los sillares del arranque del arco más cercano, en cuatro hileras y toda la anchura de la bóveda.

Primero se hizo una comparación entre las dimensiones del espesor de la rosca y las que se obtendrían utilizando una serie de reglas empíricas que, durante los siglos XVIII y XIX, estuvieron en uso para puentes con bóvedas de trazado semielíptico; concluyén-



FIG. 6 Puente antiguo de San Vicente.

dose que se encontraban en total consonancia con lo recomendado por los ingenieros de la época. Una parte importante de estas fórmulas y mucho más se puede encontrar en el trabajo de S. Huerta (Huerta, 2004).

En segundo lugar se hizo un análisis de colapso, con el fin de intentar determinar la carga de colapso para los distintos mecanismos que podrían producir la ruina de la bóveda. En el cálculo se utilizó el Teorema Fundamental de Análisis Límite (Teorema del límite inferior) compilado por el profesor Heyman (cuyas publicaciones se pueden encontrar en el Instituto Juan de Herrera), concluyéndose que, aun despreciando la aportación resistente de la parte no comprimida de la sección, la carga era de 12 toneladas; carga que en la situación de peatonalización del puente no debería sobrepasarse de ninguna manera.

Además, se hicieron dos sondeos para determinar la posición y alcance de las fisuras, con resultados bastante tranquilizadores. Así, y después de analizar las hiladas de la pila adyacente para determinar posibles asentamientos, y con los datos de los testigos colocados en el año 1998, se concluyó que la patología no resulta tan alarmante para el uso actual del puente, y que bastará con un cosido con agujas de acero inoxidable y un sellado cuidadoso de las fisuras con productos epoxídicos, además de la restauración superficial de los sillares afectados, y de la colocación de testigos para su control posterior.

El resto de las actuaciones serán similares a las que se llevaron a cabo en Briñas, a las que se añadirá la iluminación del puente (se ha proyectado una similar a la recientemente llevada a cabo en el de Alcántara) y la urbanización de las zonas adyacentes.

Solo cabe esperar que, en un futuro no muy lejano, las circunstancias permitan llevar a cabo las labores de restauración que devuelvan todo su esplendor a esta obra formidable que es el puente antiguo de San Vicente de la Sonsierra [FIG. 6] [8].

NOTAS

1. Las obras de ampliación de los puentes de Murillo, Cervera, Arnedo y Anguciana, se proyectaron y dirigieron por el personal técnico del Servicio de Carreteras:
   Murillo: Marta Cordón Ruete, I.C.C.P.
   Cervera: Francisco Soto Fernández, I.C.C.P.
   Arnedo y Anguciana: José Miguel Mateo Valerio, I.C.C.P.
2. La ampliación del puente de Briones se proyectó con IDEAM (Francisco Millanes Mato, I.C.C.P.).
3. Se emplea el anglicismo «cantiléver» para hacer mención al tipo estructural asociado a tramos en voladizo con continuidad, que nos parece no recoge completamente el término «voladizo».
4. La ampliación del puente de Cihuri se proyectó con Arenas y Asociados (Guillermo Capellán Miguel, I.C.C.P.).
5. El puente nuevo de San Vicente de la Sonsierra se proyectó en colaboración con IDEAM.
6. La restauración del puente de Briñas se proyectó con Cintec, S.L. (José Ramón Ranz I.C.C.P.), y la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra fue de Arenas y Asociados.
7. La restauración del puente de San Vicente se proyectó con Arenas y Asociados.
8. Las Direcciones de Proyecto y Obra en los puentes de Arnedo, Anguciana, Briones, Cihuri, San Vicente y Briñas fueron de José Miguel Mateo Valerio.

BIBLIOGRAFÍA

ARRÚE, B. y VALGAÑÓN, J. G. (coords.) (1998), *Catálogo de puentes anteriores a 1800. La Rioja,* Madrid, CEHOPU.
HUERTA, S. (2004), *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica,* Madrid, Instituto Juan de Herrera.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a la Fundación Juanelo Turriano, a José Mª Goicolea y a Francisco Javier León, con quien abordamos, con notable éxito, la restauración del Puente de Hierro de Logroño; la obra de este tipo más importante que se ha llevado a cabo en La Rioja.

Volver al índice

15
Experiencias desde la Administración de puentes ferroviarios

RAFAEL OZAETA GARCÍA-CATALÁN
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Subdirector de Infraestructura, ADIF
LUIS ESTERAS ALDEA
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Área de Infraestructura, ADIF

UN POCO DE HISTORIA

La explotación ferroviaria en España se inicia en 1837 en Cuba, línea La Habana-Güines. La construcción de este tramo de 28 km se llevó a cabo por la Administración pública. En la península, el primer ferrocarril data de 1848, línea Barcelona-Mataró. La construcción de dicho ferrocarril se realizó por parte de la Gran Compañía del Camino de Hierro de Barcelona a Mataró y Viceversa (capital mixto hispano-inglés).

Se trata sin embargo de dos experiencias que podrían considerarse aisladas, ya que no existía en el momento de ponerse en marcha amparo legal generalizado al desarrollo del ferrocarril. En 1855 se aprueba la Ley General de Ferrocarriles, que será la que propicie el desarrollo de este medio de transporte por todo el país.

La Ley General de Ferrocarriles plantea la construcción y desarrollo ferroviarios como una concesión. Se diseña desde el Estado una red radial de ferrocarriles, y se concursa la construcción y explotación de las diferentes líneas en régimen de concesión por un periodo de 99 años. Esta ley fija las características que deberá tener la infraestructura, entre las que destaca, por su influencia posterior, la fijación del ancho de vía en 1.668 mm.

Al amparo de esta Ley se forman diferentes compañías, muchas de ellas con capital extranjero:

- Caminos de Hierro del Norte de España. Data de 1858 y agrupa tres concesiones: Madrid-Valladolid, por Ávila, Valladolid-Burgos y Burgos-Hendaya. En 1864 se completa la línea Madrid-Hendaya.
- Madrid-Zaragoza-Alicante (MZA). Data de 1856. Construye además las líneas que conectan Madrid con Andalucía.
- Otras compañías (Andaluces, Red Catalana, Oeste…).

En 1866, consecuencia de la crisis financiera, muchas compañías desaparecen, o se fusionan con las más grandes.

En 1877 se da un nuevo impulso a las concesiones con la Ley del Ferrocarril. Las principales consecuencias de esta nueva ley fueron:

- Agrupación de compañías, siendo las de mayor tamaño MZA, Norte y Compañía de Ferrocarriles Andaluces (70 % del total de la red).
- 11.040 km de red construida en 1900, en ancho ibérico (en la actualidad la cifra es de 11.483 km).

La electrificación se inicia en España en 1911 (entre Gérgal y Santa Fé, en la línea Linares-Almería), siendo uno de los hitos más destacables en este ámbito la electrificación de la línea del puerto de Pajares (León-Gijón), en 1924.

En ese año, se promueve el Estatuto Ferroviario (aprobado por R.D. de 12 de julio de 1924), que completa los estudios para la construcción de las líneas:

- Madrid-Burgos.
- Zamora-Coruña.
- Aranjuez-Utiel.

Se trata de una concepción distinta de las promovidas en el siglo XIX, ya que estas líneas se diseñan como directas, punto a punto, sin muchas estaciones intermedias. Las líneas construidas en el siglo XIX, en cambio, pasan habitualmente por todas las capitales de provincia. Las líneas planificadas en los años 20 no se construyen en el momento, dada la crisis económica de las compañías ferroviarias. Es en esta época cuando se empieza a plantear su nacionalización.

Tras la Guerra Civil, en 1941, se crea RENFE, que aglutina toda la red ferroviaria de ancho ibérico (incluida como excepción Navacerrada-Cotos, de ancho métrico).

FEVE, aglutinadora de las líneas de ancho métrico, se crea en 1965, si bien desde 1941 la empresa estatal Explotaciones de Ferrocarriles del Estado ya explota esa red.

Los hitos constructivos de la segunda mitad del siglo XX son:

- Se producen cierres de líneas, algunas de ellas inacabadas: Santander-Mediterráneo o Baeza-Utiel.
- Inauguración de la línea Zamora-Coruña (1958) y Madrid-Burgos (1968), cuyos estudios se realizaron en los años 20.
- Extensión de la electrificación en los años 70 como consecuencia de la crisis del petróleo.
- Incremento de velocidades hasta 160 km/h.

Ya en los años 80, con una red de ancho ibérico de 13.000 km, se produjeron cierres de líneas de escaso tráfico:

- Cierre de 915 km de líneas de ancho ibérico.
- Transferencia de líneas de ancho métrico a las Comunidades Autónomas (Euskotren, FGC, FGV…).

Como consecuencia de la saturación de Despeñaperros, en 1986 se plantea el NAFA (Nuevo Acceso Ferroviario a Andalucía), que, con el tiempo, se convirtió en la primera línea de alta velocidad en España, que uniría Madrid y Sevilla.

Desde entonces se ha promovido el desarrollo de la red de Alta Velocidad Española (AVE), con las siguientes características:

- Ancho UIC (1.435 mm).
- Electrificación a 25.000 V.
- Sistemas de señalización diferenciados.

Con el paso de los años el modelo de alta velocidad se consolida y se extiende, llegando al inicio de 2015 a un total de 2.322 km de vía de alta velocidad.

Ya en el siglo XXI, la política de desarrollo del ferrocarril evoluciona de la siguiente manera:

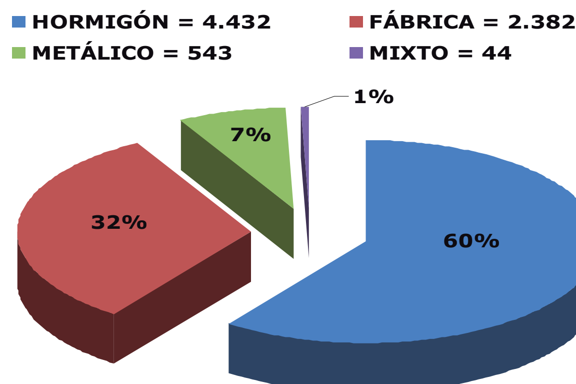
- 2005 Segregación ADIF-RENFE Operadora.
- 2013 Integración FEVE en ADIF-RENFE Operadora.
- Continuidad construcción de líneas de Alta Velocidad.

En la siguiente tabla se resumen las características de la infraestructura ferroviaria del siglo XIX comparada con la infraestructura que se construye actualmente:

FACTOR	SIGLO XIX	SIGLO XXI
Estructuras	Metálicas de hierro Fábrica de sillería o ladrillo Capacidad hidráulica limitada	Hormigón Acero Estudios de avenidas
Túneles	Sección ajustada Revestimientos de fábrica Someros Sin medidas de seguridad	Amplia sección Revestidos de hormigón Profundos Dotados de medidas de seguridad
Explanaciones	Muy verticales Taludes próximos a la vía Ejecución deficiente	Tendidas Alejadas de la vía Control de obra
Pasos a nivel	Sin proteger	Evitarlos
Peso de carril	42 k por metro	54 o 60 en líneas AV
Traviesa	Madera	Hormigón
Sujeción	Rígida	Elástica
Juntas	Sí	Sin juntas
Desvíos	Accionamientos manuales	Motorizados Cruzamientos móviles
Velocidad	40 km/h	330 km/h (AV) 200-220 km/h (red convencional)
Peso máximo locomotora	30-40 toneladas	Hasta 120 toneladas

VISIÓN GENERAL DEL PATRIMONIO

Actualmente en la red ferroviaria gestionada por ADIF (tanto ancho métrico como ancho ibérico) existen 7.500 puentes, con la siguiente distribución por materiales:



Entre las tipologías de fábrica, un 36 % del total son fábrica de ladrillo y un 64 % son fábrica de sillería.

En función de su antigüedad, la tipología de las estructuras varía:

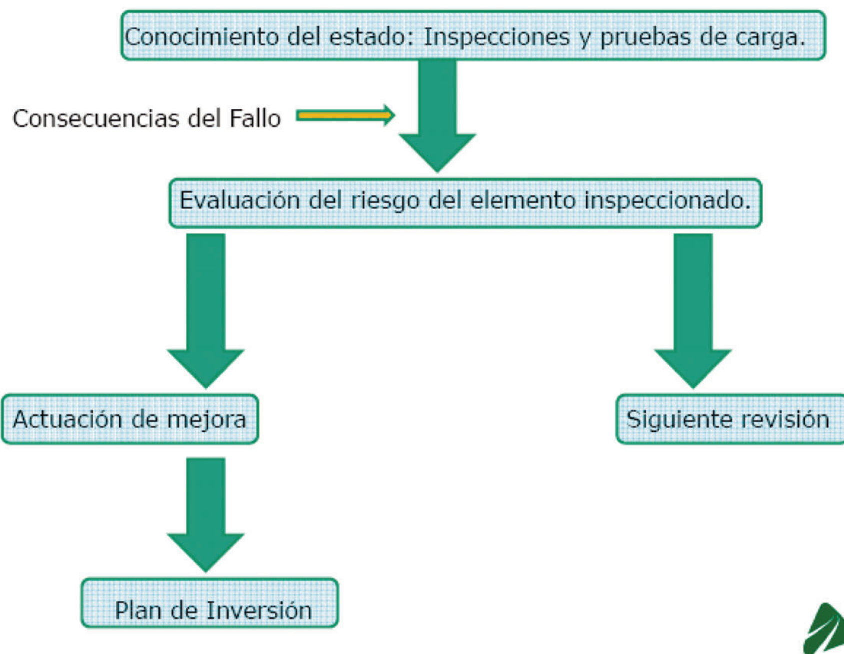
- Puentes de fábrica: 1848-1925, se construyeron y perduran desde el origen de la línea donde están implantados.
- Puentes de hormigón en masa: 1900-1950.
- Puentes de Hormigón Armado y/o pretensado: 1950-actualidad.
- Puentes metálicos roblonados: 1900-1950.
- Puentes metálicos soldados o T.A.R.: 1950-actualidad.

En las tipologías de fábrica, se puede apreciar una homogeneidad tipológica y de materiales por líneas y zonas. Esto es debido a dos factores:

- Las compañías ferroviarias que construyeron la red siguen unos patrones constructivos.
- En las obras de fábrica se emplean, por optimización de costes, los materiales más abundantes y de mejor calidad de cada zona.

CICLO DEL MANTENIMIENTO

En todo mantenimiento es básico seguir un esquema que fije las distintas fases del mismo. De modo general, cualquier mantenimiento se debe iniciar con un proceso que permita conocer el estado de conservación de los elementos a mantener, y debe finalizar con una toma de decisiones que concluya si hay que intervenir en la estructura o no. También se deben tener claros qué criterios se van a emplear en esa toma de decisiones.



INSPECCIONES Y PRUEBAS DE CARGA

El primer paso del ciclo de mantenimiento es el conocimiento del estado de los puentes, para ello se procede a la inspección de los mismos y, en algunos casos particulares (puentes metálicos), pruebas de carga.

En el caso de estructuras ferroviarias existe normativa tanto interna de ADIF como del Ministerio de Fomento, que es la que enmarca estas actuaciones:

- Orden Ministerial ITPF 05 (Instrucción sobre las Inspecciones Técnicas a Puentes de Ferrocarril). Ministerio de Fomento.
- Procedimiento Operativo «SGSC-PO-24.00.08 Vigilancia del estado de la infraestructura y la vía». ADIF.
- Inspecciones de Cauce. ADIF.

En dicha normativa se definen los siguientes conceptos:

- **Inspecciones básicas**: Se realizan por personal de vigilancia e inspección general de la línea. En todos los puentes con luz igual o superior a 10 metros, independientemente de su tipología y material constructivo. También en aquellos puentes con luz igual o superior a 6 metros, que trabajen fundamentalmente a flexión. Se realizarán anualmente.
- **Inspecciones principales**: Se realizan por técnicos especialistas. En todos los puentes con luz igual o superior a 6 metros, independientemente de su tipología y material constructivo. Se realizarán dentro del año siguiente a aquel en que se cumplan 15 años como máximo desde la última inspección.
- No será necesario emplear equipos ni medios técnicos especiales, son de carácter visual, salvo los de acceso, en su caso, a los diferentes elementos de la estructura.

Como resultado de las inspecciones principales, los daños observados se clasifican en:

- **Clase 1**: Daños que puedan afectar a la seguridad de la estructura y por tanto, a su capacidad de resistir las cargas para las que fue proyectada.
- **Clase 2**: Pueden afectar al equipamiento o a la vida útil de la estructura (seguridad estructural a largo plazo).
- El plazo máximo para reparar los daños de **Clase 1** será de 4 años a partir de la fecha de la inspección principal, salvo que debido a la gravedad de aquellos se hubiera fijado un plazo inferior.
- El plazo para reparar los daños de **Clase 2** quedan bajo el criterio del administrador de la infraestructura.

Adicionalmente a lo anterior, tanto la normativa ministerial como la interna de ADIF establecen la siguiente metodología de trabajo:

- Como consecuencia de los resultados de los Informes de Inspección Principal, y con el fin de ampliar el conocimiento sobre el estado de la estructura, en determinados casos es necesario realizar una INSPECCIÓN ESPECIAL, que incluya la ejecución de ensayos complementarios (campañas geotécnicas, comprobación estructural o incluso pruebas de carga de control en servicio).
- En aquellos puentes que crucen un cauce, se realiza la correspondiente INSPECCIÓN DE CAUCE. En los casos de aquellos puentes que la inspección del cauce así lo aconseje, se realizarán INSPECCIONES SUBACUÁTICAS para determinar el estado de la cimentación de aquellas pilas o estribos que se encuentran sumergidos.

Se resumen en los siguientes cuadros los conceptos asociados a inspección y prueba de carga:

INSPECCIÓN DE PUENTES (ITPF-05)

BÁSICAS	PRINCIPALES	ESPECIALES
Se realizarán por personal de vigilancia e inspección general de la línea.	Se realizarán por técnicos especializados en puentes.	Se realizarán por técnicos especializados.
En puentes con alguna luz ≥ 10 m, independiente de su tipología o material constructivo; al igual en puentes con alguna luz ≥ 6 m que trabajen fundamentalmente a flexión.	Todos los puentes con alguna luz ≥ 6 m, independiente de su tipología o material constructivo.	Incluirá ejecución de ensayos complementarios, comprobación analítica completa de la estructura e incluso la realización de pruebas de carga de control en servicio.
Se realizarán anualmente.	Como máximo dentro del año siguiente en que se cumplan 15 años de su última inspección.	Cuando tras la inspección principal se requiera recabar información adicional.

PRUEBAS DE CARGA DE PUENTES (ITPF-05)

TIPO	ALCANCE	PERIODICIDAD
De recepción de obra nueva: Evaluación del comportamiento estructural del puente.	Puentes con algún vano ≥ 10 m independiente de su tipología o material constructivo. Se puede incluir de luz inferior con tipología o características especiales. Se excluyen los de montera > 2,5 metros.	Se realizará antes de su puesta en servicio.
De puentes en servicio: Ampliar el conocimiento del estado de la estructura, periódicamente o aconsejado por una inspección.	En estructuras metálicas o mixta con luz ≥ 10 m. En puentes de hormigón o fábrica no es necesario, salvo lo aconseje la inspección principal. Se excluyen los de montera > 2,5 metros.	Todos los puentes de estructura metálica o mixta. – Uniones roblonadas o atornilladas, dentro del año siguiente a los 15 años de la última prueba de carga. – Unión soldada será de 30 años.

En relación con los procedimientos internos de ADIF relativos a inspección y vigilancia, el «SGSC-PO-24.00.08 Vigilancia del estado de la infraestructura y la vía» recoge, en relación a las estructuras, los mismos criterios y periodicidades que los que ya establece la ITPF-05, por lo que no se profundiza más en ello. Sí se detalla a continuación la metodología establecida por ADIF para las inspecciones de cauce, ya que no figuran en la instrucción ministerial.

Las inspecciones de cauce tratan de evaluar el deterioro de la cimentación de la estructura por erosión local. La inspección recoge varias fases: Análisis de información, Cálculos de caudales, Inspecciones técnicas en campo, Estudio teórico y Clasificación final. En este último punto, se hacen dos valoraciones, que resultan de los análisis tanto teóricos como de visitas de campo:

- **Valoración del Índice de Socavabilidad, IS**: Entre 0 y 10 (Lecho socavable IS menor que 5.5, Lecho No Socavable IS mayor de 5.5).
- **Valoración del Índice de Erosión, IE**: Erosión Potencial en el cálculo de avenidas (valor comprendido entre 0 y 10).
- **Índice de Riesgo, IR: IR=IS+IE**. (Valor comprendido entre 0 y 20).
- **IR entre 0 y 10**: Proyectos de Reparación o Protección.
- **IR entre 10 y 20**: No necesitan medidas especiales de protección.

EVALUACIÓN DEL RIESGO

A la hora de establecer el ciclo de mantenimiento, la primera fase del proceso es el conocimiento del estado de las estructuras. Sin embargo, se dan circunstancias no estrictamente ligadas al estado de la estructura que pueden agravar las consecuencias de un fallo, por ejemplo, el hecho de que haya mucho tráfico o de que el puente tenga mucha altura.

Según el **artículo 3 de la Directiva 2004/49/CE** sobre la seguridad de los ferrocarriles comunitarios se define:

- **Peligro**: una circunstancia que puede provocar un accidente.
- **Riesgo**: La frecuencia de ocurrencia de accidentes e incidentes que provoquen daño (causado por un peligro) y la gravedad del daño.

Esta directiva tiene como ámbito de aplicación aquellos riesgos en la seguridad en la circulación que se generan en la explotación de la RC de las siguientes infraestructuras: puentes, túneles, terraplenes y trincheras. Igualmente, tiene en cuenta los defectos en la vía, aparatos de vía (desvíos, travesías y encarriladoras) y en el carril.

Como consecuencia de estas directivas comunitarias, ADIF redacta procedimientos internos de evaluación del riesgo. La metodología que se sigue en este aspecto es la siguiente:

Gestión de Riesgos en las Infraestructuras de Red Convencional que afectan a la Seguridad en la Circulación. SGSC-PO-08.00.01:

- Peligro asociado a puente: colapso total o parcial.
- Riesgo asociado a peligro: descarrilamiento.
- Nivel de deficiencia del puente: en función del resultado de inspección principal del puente.
- Nivel de exposición al peligro basado en número de circulaciones anuales en el punto. Valorado entre 1 y 4.

Valoración del nivel de deficiencia:

Valor ITPF-05	Valor asociado
Daños de clase 2	1
Daños de clase 1	14

Valoración del nivel de exposición al peligro:

Número de circulaciones anuales (C)	Valor asociado
$C \leq Q1$	$\frac{C}{Q_1}$
$Q1 \leq C \leq Q2$	$\frac{C - Q_1}{Q_2 - Q_1} + 1$
$Q2 \leq C \leq Q3$	$\frac{C - Q_2}{Q_3 - Q_2} + 2$
$Q3 \leq C \leq Q4$	$\frac{C - Q_3}{Q_4 - Q_3} + 3$

- Nivel de Consecuencia. Indica la magnitud (severidad) de los daños causados por la ocurrencia del suceso. Se usa como dato de entrada la velocidad de circulación según el cuadro de velocidades máximas (CVM). Aplicando la siguiente fórmula se obtiene NC.

Velocidad de circulación (V)	Valor asociado
V	$3{,}108 \cdot 10^{-5} \cdot V^2 + 1{,}134 \cdot 10^{-2} \cdot V$

- Nivel de Riesgo: Nivel de Exposición x Nivel de Deficiencia x Nivel de Consecuencia.

Valor (NR)	Nivel de Riesgo
NR < 98	Bajo
98 < NR < 196	Medio
196 < NR < 294	Alto
294 < NR	Muy Alto

- Planteamiento de medidas mitigadoras tipo: limitación de la velocidad o de la carga sobre la estructura, vigilancias más frecuentes…

ACTUACIONES DE MEJORA. EJEMPLOS

Las actuaciones de mejora que habitualmente se llevan a cabo en las estructuras gestionadas por ADIF son:

- Tratamientos superficiales:
  - Limpieza de vegetación adosada.
  - Limpieza general de saneamientos.

- Tratamientos de recomposición: dovelas o ladrillos caídos, pérdida de sección.
- Refuerzos estructurales: inyección de trasdós de bóveda.
- Protección frente a las socavaciones.
- Elementos auxiliares (paseos).

Los condicionantes generales que se tienen en cuenta a la hora de diseñar los tratamientos a aplicar en las estructuras se han modificado en los últimos años. Anteriormente se empleaban directamente materiales de construcción actuales sobre materiales antiguos. Además, por desconocimiento del comportamiento de la fábrica, se planteaba un exceso de refuerzos a estructuras. Con los estudios que se han llevado a cabo en el sector, se ha llegado a una mejor comprensión del comportamiento resistente de los puentes de fábrica, de modo que los refuerzos que se plantean están mejor justificados, aprovechan mejor el comportamiento estructural de la fábrica, y emplean materiales compatibles con la fábrica existente. A modo de resumen, los criterios que se emplean a la hora de diseñar actuaciones de mejora son:

- Uso de materiales respetuosos con la fábrica.
- Intervenciones poco invasivas.
- Cuidado estético.

Se muestran a continuación varios ejemplos de reparaciones de puentes de fábrica:

Reparación del puente sobre la Riera de Boixadell, p.k. 324/648 de la línea Zaragoza-Lérida-Barcelona

Problemática:

- Pérdida de rejuntado.
- Manchas de humedad, eflorescencias, suciedad superficial.
- Fisuras en fábrica de ladrillo.
- Falta de paseos de servicio.



FIG. 1 Aspecto general del puente sobre la Riera de Boixadell, p.k. 324/648 de la línea Zaragoza-Lérida-Barcelona.

Solución adoptada:

- Rejuntado con mortero de cal.
- Limpieza superficial con chorro de agua y silicato de alúmina.
- Inyección de fisuras, reconstrucción de ladrillos dañados con mortero de cal.
- Ejecución de drenajes.

Reparación del puente de Frómista, p.k. 329/477 de la línea Venta de Baños-Santander

Problemática:

- Descuelgue de sillares.
- Falta de rejuntado.
- Manchas de humedad, eflorescencias, suciedad superficial.

Solución adoptada:

- Limpieza superficial con chorro de silicato de alúmina.
- Picado superficial de zonas con pérdida de rejuntado.
- Rejuntado con mortero de cal.
- Reconstrucción de sillares con mortero de cal macroporoso y mortero convencional con posible armado de varillas.
- Inyección de rellenos del trasdós con lechada de cal y resinas epoxi.
- Ejecución de desagües.
- Colocación de barandillas.



FIG. 2 Aspecto general del puente de Frómista, p.k. 329/477 de la línea Venta de Baños-Santander.

Reparación del puente del p.k. 64/878 de la línea Barcelona-Massanet



FIG. 3 Aspecto general del puente del p.k. 64/878 de la línea Barcelona-Massanet.

Problemática:

- Suciedad superficial.
- Socavación de la solera aguas abajo del puente.
- Pérdida de piezas de ladrillo.

Solución adoptada:

- Demolición de solera existente.
- Limpieza del cauce.
- Construcción de nueva solera.
- Protección con escollera del pie de la solera.
- Protección de márgenes adosadas al puente con escollera.

Reparación de tres puentes de la línea Zaragoza-Alsasua

Problemática:

- Separación boquilla de sillería-bóveda de ladrillo.
- Grietas longitudinales en bóveda.
- Deterioro general de la fábrica de ladrillo.

Solución adoptada:

- Limpieza superficial.
- Inyección de trasdós de bóveda a través de tímpano con tres materiales diferentes (gel de silicato de sodio, resina epoxi de baja densidad y etil silicato).
- Test de prueba de carga antes y después del tratamiento.
- Test de humedades y mapa de sales antes y después del tratamiento.

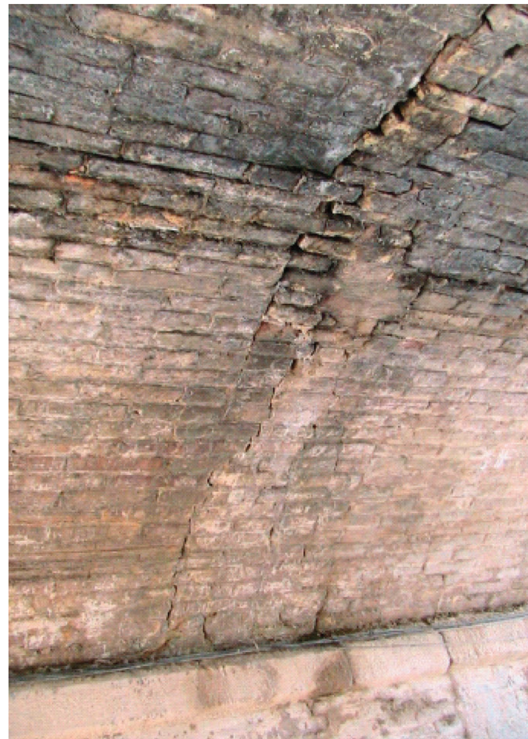


FIG. 5 Detalle del daño en el puente del p.k. 66/613 de la línea Zaragoza-Alsasua.

Volver al índice

16

Los puentes de piedra: visiones desde la Ingeniería y las Ciencias Sociales

JOSÉ ROMO MARTÍN
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Licenciado en Historia

HACIA UNA VISIÓN COMPLETA DE LA IMPORTANCIA DE LOS PUENTES EN EL CONTEXTO TÉCNICO Y SOCIAL EN QUE SE CONSTRUYEN

El puente es uno de los pocos objetos en los que la Ingeniería, el Diseño, la Política, la Economía y la organización social de una época cristalizan en un artefacto único.

Los puentes son siempre una expresión de su tiempo; su emprendimiento, proyecto, construcción y «explotación» dependen de múltiples vectores que reflejan tanto las capacidades como las actitudes de una época. La valoración de los puentes a lo largo del discurrir histórico ha dependido de las necesidades y la importancia que hayan tenido para la sociedad que o bien los hereda o bien los promueve.

La forma en la que los puentes son apreciados o evaluados ha variado notablemente a través de la Historia. Esta visión o valoración no ha sido lineal, sino que ha fluctuado, como ha ocurrido y ocurre también con aquellos objetos creados por la humanidad y que tienen una funcionalidad, pero que al mismo tiempo poseen, en muchos casos, una belleza formal e incluso un valor simbólico para la sociedad del momento.

Ese reflejo del puente como una expresión de la cultura material e inmaterial de un tiempo, hace que la valoración de los puentes históricos tenga que realizarse de una forma global. Por esa razón, tanto las visiones aisladas realizadas desde la óptica de la Ingeniería, como las realizadas desde las Ciencias Sociales resultan parciales y, por lo tanto, incompletas.

En este breve texto se pretende ahondar en la importancia de la visión global, complementada con la mirada especializada que, tanto desde la Historia como desde la Ingeniería, permite comprender mejor la importancia, tanto de un puente concreto, como del conjunto de puentes asociados a un determinado tiempo histórico.

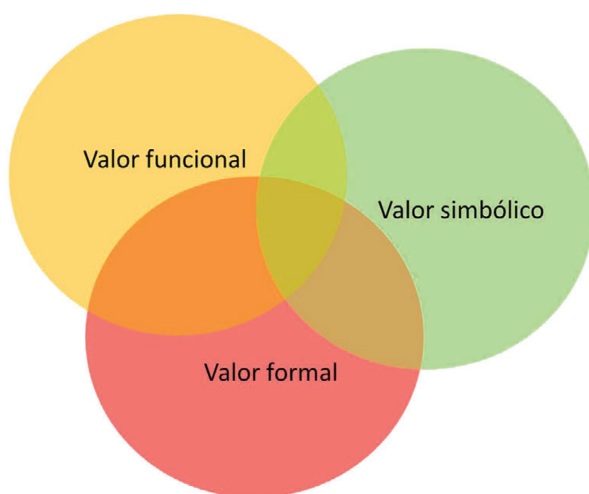


FIG. 1 Criterios para la jerarquización y valoración del Patrimonio.

Los puentes forman parte del patrimonio construido y por tanto de la Cultura en el sentido antropológico de este concepto. El número de puentes construidos desde la Edad Antigua hasta nuestros días es inmenso y, por lo tanto, resulta necesario establecer unos criterios de valoración que permitan conformar una jerarquía, con el fin de definir las prioridades en términos de la protección, la conservación y el mantenimiento de este Patrimonio.

Esa clasificación debe permitir determinar la importancia de una obra aislada o de un conjunto de obras. Una forma de establecer esa jerarquía consiste en emplear una serie de valores de referencia que se agrupan en tres conjuntos fundamentales: El valor de uso, el valor formal y el valor simbólico (Ballart, 1997) [FIG. 1].

En los apartados siguientes se desarrolla la aplicación de estos conceptos a los puentes históricos, incluyendo de forma sucinta la visión de estos valores desde la óptica de las Ciencias Sociales en general, y de la Historia en particular, así como desde la perspectiva de la Ingeniería.

El valor de uso de los puentes

El valor de uso, en su sentido más amplio, se refiere no solo al valor funcional y económico del puente sino también al valor científico-técnico de la obra.

Bajo el punto de vista las Ciencias Sociales, el valor de uso de un puente de piedra o ladrillo, o de un puente histórico en general, tiene dos grandes vertientes. La primera de ellas es la consideración del puente histórico como pieza de referencia de investigación y conocimiento, y la segunda es aquella en la que el puente es tratado como un objeto de gestión en términos de divulgación científica y explotación comercial.

Como elemento de investigación y conocimiento, el propio puente histórico y sus referencias en fuentes escritas, tales como legados, mandas o testamentos en el Medievo, permiten conocer el sistema económico del momento. De esta forma, y gracias a las fuentes disponibles, se puede llegar a saber cómo se financió la obra, cuál era el régimen impositivo, cómo se gestionaban los pontazgos, o las derramas asociadas a la construcción del puente.

El puente histórico también permite investigar sobre aspectos jurídicos y administrativos de la sociedad del momento. Por ejemplo, en la Edad Media los puentes se consideraban frecuentemente figura jurídica plena, y como tal, con capacidad legal para poseer bienes y negociar con ellos (Iranzo, 1977).

Las diversas fuentes en las que se cita el puente histórico permiten conocer las actividades que se desarrollaban en torno al mismo. Así por ejemplo, en un puente medieval,

las fuentes usualmente posibilitan conocer la organización de los trabajos de maestros, limosneros, recaudadores de impuestos y ponteros.

También a partir de la información generada alrededor de los puentes históricos medievales se pueden conocer mejor las actividades realizadas por las Cofradías en la construcción de los puentes y el significado de estos como expresión del dominio señorial o local.

Los puentes, con sus inscripciones y sus referencias en las fuentes escritas, permiten también ahondar en el conocimiento de las creencias religiosas y en los mitos del momento histórico en el que se construyeron.

Otro de los valores de uso de los puentes históricos es la posibilidad de ser objeto de divulgación e incluso de explotación económica. Así, en el caso de puentes singulares, resultaría de gran interés encuadrarlos dentro de itinerarios turístico-culturales, lo que permitiría generar recursos económicos que podrían ser invertidos en su conservación y salvaguarda.

El valor de uso de los puentes históricos bajo el punto de vista de la Ingeniería es diametralmente opuesto a la visión desde la Historia. No obstante, la óptica desde la Ingeniería y desde las Ciencias Sociales se complementa y su suma favorece tener una perspectiva más global sobre el valor del uso de la obra.

Desde la Ingeniería el valor del uso está asociado a su función como elemento de la red de comunicaciones, aunque también con mucha frecuencia puede llegar a ser objeto de investigación, para mejorar el conocimiento ingenieril.

Bajo el primer enfoque, los puentes de fábrica que han llegado a nuestros días tuvieron como misión el formar parte de una red de transporte de la época clásica, medieval o moderna. En muchos casos, especialmente los puentes que se encuentran en el ámbito rural, han dejado de formar parte de las redes de transporte contemporáneas, tanto por las exigencias del trazado de los ferrocarriles actuales como por las nuevas necesidades de la red de carreteras y autopistas. Muchas de estas obras han quedado en una situación de obsolescencia funcional que ha conducido al abandono y ruina de estas obras.

Es una preocupación constante de muchos ingenieros estructurales el vencer esa obsolescencia, realizando las operaciones de ensanche o refuerzo de esas obras, en la idea de evitar el abandono funcional de las mismas que en muchos casos conlleva la ruina de estas estructuras. Esta necesidad de actuar puede contrastar con la aproximación arqueológica basada en la no intervención y el mantenimiento a ultranza del objeto tal y como ha llegado a nuestros días, lo que supone en algunos casos una situación de conflicto, similar a la que ocurre en las intervenciones en edificios de interés como parte del patrimonio histórico.

Una situación bien distinta es la que ocurre en el caso de puentes situados en las ciudades. En ellas, los puentes de piedra siguen cumpliendo, en general, una funcionalidad básica ya que forman parte del tejido urbano mucho más estable. Además, los puentes de las ciudades suelen formar parte del acervo cultural, constituyéndose muchas veces en hitos urbanos (Lynch, 1959), y estando por lo tanto mucho más protegidos frente a la amenaza de obsolescencia.

Es importante destacar aquí el empeño de los ingenieros de evitar la obsolescencia del puente, manteniéndolo dentro de la red de transporte. Esta es sin duda la mejor forma

de evitar la ruina de la obra al caer en desuso (Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica» de la ATC-AIPCR, 2014).

En general, la adaptación a las condiciones funcionales del presente supone la intervención, que, como hemos señalado, puede entrar en colisión con la aproximación arqueológica, en la que prima el espíritu de conservación.

Otro valor de uso del puente histórico para el mundo de la ingeniería estructural es su posible utilización como fuente de conocimiento. Una estructura antigua permite conocer la evolución del arte de la construcción. De su estudio se pueden conocer mejor los sistemas estructurales del pasado, que tienen valor tanto bajo el punto de vista académico como por ser fuente del conocimiento teórico y práctico necesario para la realización de futuras intervenciones en puentes históricos.

El puente de piedra puede incluso dar un último servicio, permitiendo conocer su configuración completa y su comportamiento estructural hasta rotura cuando, por desgracia, la obra tiene que ser demolida (León y Espejo, 2007).

Valor formal

La forma o apariencia estética es, muy a menudo, uno de los valores fundamentales de gran parte de los puentes históricos. No es una casualidad que muchos de estos puentes hayan llegado más o menos intactos a nuestros días, incluso cuando ya han perdido la funcionalidad para la que fueron concebidos.

La estética o, mejor, el estímulo estético han impulsado el movimiento conservacionista a lo largo de la Historia (Lipe, 1984). En Historia del Arte, el valor formal de una obra se establece desde la Academia, o el Museo como extensión de esta, o bien desde el mundo profesional del Arte. El valor de una obra se basa en su singularidad e unicidad (pieza única), que trasciende a la propia funcionalidad del objeto. Una obra de Arte es siempre una obra única e insustituible.

En Historia del Arte, esos objetos singulares se suelen clasificar por Tipologías, Estilos o Escuelas. Hasta la Revolución Industrial, el Estilo es común al conjunto de la construcción de una época. De esta forma, no aparecen diferencias significativas entre el estilo de un edificio civil, por ejemplo, y el de un puente.

Es habitual que, desde la Historia del Arte, los puentes históricos se engloben dentro de los Estilos asociados a cada época o cultura. Sin embargo, esta aproximación al valor formal de los puentes se rompe cuando se disocian claramente la ingeniería de la arquitectura, fundamentalmente con la aparición de los materiales modernos. Desde ese momento, se puede afirmar que tanto el mundo de la Ingeniería como el de la Arquitectura se enfrentan a nuevos retos, y se rompe de alguna forma esa comunión en el gusto constructivo que ha sido una constante hasta el siglo XIX.

En el siglo XIX hay dos fenómenos significativos: por una parte aparece el objeto industrial y, por otra, aparecen los nuevos materiales: el hierro y, posteriormente, el acero, que suponen un cambio sustancial en el mundo cotidiano.

Así el objeto industrial se realiza inicialmente con los mismos recursos estéticos que la artesanía, para después crear un lenguaje propio, generalmente provocado por la apa-

rición de objetos nuevos: el ventilador, la lámpara eléctrica, etc., que ya no podían copiarse de ningún objeto artesanal previo.

Del mismo modo, en el ámbito de la construcción aparecen nuevos tipos constructivos: la estación, el mercado, el viaducto, etc., que se tienen que resolver con hierro y acero. Estas nuevas necesidades supusieron la definitiva ruptura del estilo de construcción común entre obras de edificación y obras de ingeniería civil que había caracterizado los tiempos precedentes.

Hay que destacar que, a partir de aquí, los puentes dejan de tener su importancia para el mundo del Arte, al contrario de lo que ocurre con el mundo de la Arquitectura. Es un hecho que en los tratados de Historia del Arte no hay referencias notables a la Ingeniería de los siglos XIX y XX, en la que, sin embargo, se produjo una enorme revolución también en lo formal. Esta situación es sorprendente si se contrasta, por ejemplo, con la relevancia dada por el mundo del Arte al Movimiento Moderno en Arquitectura y a sus figuras más destacadas, como Le Corbusier, Frank Lloyd Wright o Mies Van der Rohe.

No cabe duda de que desde la Ingeniería la expresión formal es también un elemento de distinción de las obras más notables. Asimismo es cierto que el puente no es un objeto aislado, y por ello no se puede leer sin el contexto en el que se encuentra. El lugar configura el marco de referencia en el que apreciamos el puente. Allí la escala aparece como otra de las características fundamentales en la percepción visual de la obra.

Así, en el caso de la gran escala, el puente domina el paisaje, lo subyuga, y por ello es importante que la obra sea simple y bien proporcionada. En la gran escala, la claridad del sistema resistente y las formas asociadas al mismo son fundamentales para que la obra resulte agradablemente serena al observador.

En la escala media, la situación es radicalmente distinta. Aquí el puente tiene que fundirse con el paisaje. De nuevo las soluciones límpidas, sin un formalismo banal, han constituido y son hoy en día la referencia visual de los ingenieros estructurales.

Por último, en la pequeña escala, además de los valores anteriores, la importancia de los detalles juega un papel preponderante en la valoración formal de una obra. Aquí todo cobra escala humana: la obra se aprecia al caminar por ella, o al entrar en la obra, o al observarla desde un punto relativamente cercano.

Bajo el punto de vista de la ingeniería estructural, la forma suele ser la pura expresión del sistema resistente. La estructura es la esencia de la obra, y por lo tanto, la aproximación formal no constituye una parte independiente del esquema de trabajo de los ingenieros; la forma surge como consecuencia del propio lenguaje de las estructuras.

A pesar de esta aproximación puramente estructural a las formas, podemos decir que existen autores o estilos en la ingeniería estructural que tienen su expresión física y formal en obras o grupos de obras que se pueden considerar parte de una colección, en la que existen trazas o modos de hacer que el ojo experto permite discernir y clasificar. Así podríamos decir que Maillart, Menn y Conzett constituyen una forma de proyectar en hormigón que se extiende desde la década de 1920 hasta nuestros días.

A un lado de la corriente general, caracterizada por la búsqueda del récord, y la aplicación rutinaria de las soluciones canónicas sin un cuidado especial por lo formal, existe

la voluntad de un grupo importante de ingenieros que pretenden aunar rigor estructural y una expresión formal que supone un lenguaje personal.

También puede reconocerse la obra de autores individuales como Manterola, Strasky o Schlaich, que han generado un lenguaje propio en el que se reconoce además una línea clara de innovación.

En resumen, puede indicarse la poca atención del mundo de la Historia del Arte a la Ingeniería contemporánea, y la reacción, muy tibia, del mundo de la Ingeniería sobre la importancia del valor formal de las obras. Sin embargo, el valor formal del puente, tanto histórico como contemporáneo, está permanentemente presente, a pesar de la falta de eco en el mundo del Arte.

Valor simbólico

En especial los puentes históricos, y fundamentalmente los puentes de piedra o ladrillo, suelen formar parte de la iconografía de las ciudades en la que se encuentran[1]. El paisaje urbano, y con él sus puentes, comienza a ser valorado en la Edad Moderna. Estos aparecen en las obras de pintura como una marca de identidad de las ciudades al igual que otras construcciones notables como palacios o catedrales. Así el cuadro *Vista de Toledo desde el Tajo* del Greco (*c.* 1600) es la primera pintura española con el paisaje urbano como protagonista. Dentro de este cuadro se perfila el puente de Alcántara como un elemento diferenciador del perfil urbano que se retrata (Romo, 2006).

Pero quizás solo unos pocos puentes singulares tienen un valor simbólico para la ciudad en la que se encuentran; el Golden Gate o el Tower Bridge forman parte de la iconografía de las ciudades a las que sirven. Hasta tal punto que sus formas valen para identificar a las ciudades de San Francisco y Londres.

Estas obras singulares son verdaderos símbolos, que hacen que sean objetos de culto y por lo tanto tengan la más alta protección.

Bajo el punto de vista de la Ingeniería, los puentes que se podrían denominar icónicos, son también, con frecuencia, aquellos que han supuesto un hito en la historia de la Ingeniería.

Este carácter icónico puede sobrevenir como consecuencia de su naturaleza innovadora, o por haber constituido un récord que hace que la obra pase a formar parte de esa lista de puentes que han roto el desafío de la luz máxima convirtiéndose en un momento dado en récord mundial.

La importancia de la visión conjunta

Como se deduce de las reflexiones anteriores, solo desde la visión conjunta de la Ingeniería y la Historia se comprende mejor el valor de los puentes históricos.

Para ambas disciplinas los puentes tienen un valor de uso, un valor formal y, en casos especiales, un valor icónico. No siempre los criterios de valoración son los mismos, e incluso a veces pueden ser contradictorios, de forma que la suma de ambas ópticas permite tener una visión más global de la importancia de los puentes de piedra para la sociedad contemporánea.

PRESENTE, FUTURO E INNOVACIÓN: LOS PUENTES DE PIEDRA DE HOGAÑO

Dentro de las aplicaciones contemporáneas de los puentes de piedra, se pueden destacar dos maneras radicalmente distintas de aproximación al proyecto.

La primera y quizás más común es el proyecto de puentes arco de piedra con un relleno estabilizante en el trasdós de la fábrica, evocando las construcciones históricas. Esta construcción, adoptando los sistemas clásicos, se ha empleado en algunos casos incluso a una escala considerable, especialmente en el ámbito de los centros históricos de las ciudades. Un buen ejemplo de este tipo de obras es el puente de la Santa Trinidad sobre el río Arno en Florencia. Esta estructura, construida a mediados de la década de 1950, es una recreación historicista (reconstrucción tras la voladura de finales de la Segunda Guerra Mundial) de los arcos de piedra, que sigue los cánones de los puentes de la Edad Moderna.

Existen otras muchas realizaciones recientes de puentes de piedra en arco que siguen el diseño tradicional o histórico, y que no tienen un interés especial bajo el punto de vista de la Ingeniería contemporánea.

Por el contrario, existen otras obras contemporáneas que aprovechan con éxito las características mecánicas de la piedra, no en una, sino en una gran cantidad de soluciones distintas que son una buena muestra de las posibilidades presentes y futuras del empleo de la piedra como material resistente fundamental en puentes y sobre todo en pasarelas.

Dentro de este grupo de soluciones innovadoras, están aquellas en las que los elementos que trabajan a compresión se materializan en piedra mientras que los elementos traccionados se construyen en acero.

También, como se verá más adelante, hay ejemplos de otras construcciones de piedra en la que esta se combina con un pretensado para pre-comprimir la fábrica con el fin de contrarrestar las tracciones que aparecen en elementos trabajando a flexión.

La piedra, la roca, tiene una muy alta capacidad de resistencia a la compresión; así, en el caso del granito, se pueden alcanzar valores de 200 N/mm^2, muy superiores a los que tiene el hormigón contemporáneo.

Una de las ventajas a destacar de la piedra es la inexistencia de fluencia del material. Este hecho es de gran importancia, especialmente en el caso de las soluciones en que se usa pretensado, ya que no existen pérdidas diferidas, lo que permite un mayor aprovechamiento del pretensado en servicio.

También cabe resaltar que la notable resistencia a compresión de algunos tipos de roca como las graníticas, que son las habitualmente empleadas, permite, en combinación con el pretensado, tal y como se verá más adelante, conseguir soluciones de gran esbeltez.

La piedra como cordón comprimido de una viga en celosía

Una de las primeras aplicaciones de la piedra como elemento estructural en puentes y pasarelas es la pasarela de Inachus, construida en Japón en 1985. En esta obra, el arquitecto japonés Mamoru Kawaguchi emplea la piedra granítica como cordón superior de

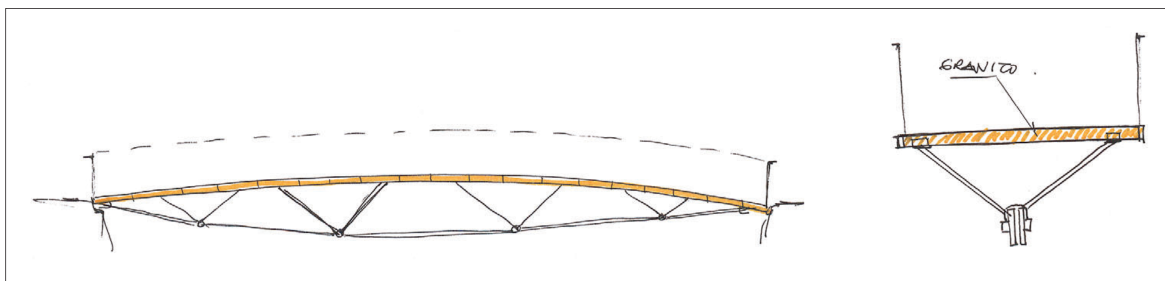


FIG. 2 Pasarela de Inachus.

la celosía que constituye la estructura de la obra. Este dintel de piedra se construye con dovelas de granito que tienen el ancho total de la pasarela. Las distintas piezas que forman el tablero presentan una junta húmeda de mortero entre ellas, aunque a la vista de las experiencias más recientes, quizás se hubiesen podido emplear juntas a hueso. Las losas de granito constituyen también el pavimento de la estructura, que dotan a la obra de una gran calidad [FIG. 2].

La combinación de la piedra y el pretensado

En obras de hormigón pretensado, el efecto favorable de este se ve reducido en el tiempo, ya que el hormigón se acorta como consecuencia de la retracción y la fluencia. En el caso de la piedra, y más concretamente del granito, la ausencia de reología del material hace que el pretensado que se introduce inicialmente en el sistema no varíe a lo largo del tiempo, reduciéndose así las pérdidas en el mismo.

Esta ausencia de retracción y fluencia en la piedra hace que su combinación con el pretensado resulte altamente atractiva en elementos trabajando a flexión, en los que el pretensado compensa el efecto de las cargas permanentes y las sobrecargas, evitando que la pieza tenga que resistir tracciones.

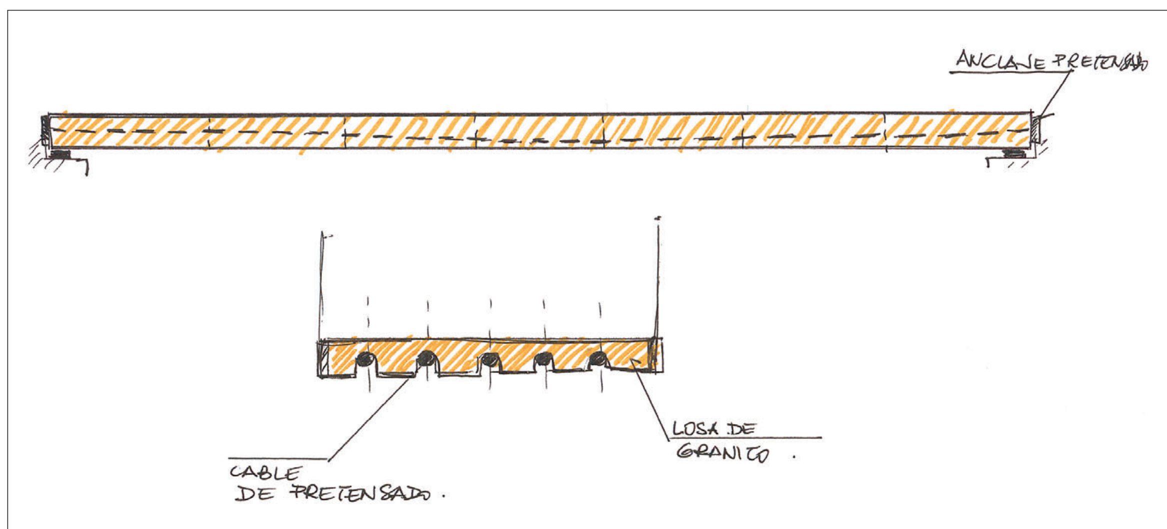


FIG. 3 Pasarela de piedra pretensada.

Así, en vigas simplemente apoyadas materializadas como un dintel en piedra, es posible utilizar un pretensado no adherente, en el que este tenga un trazado parabólico para adaptarse a la ley de momentos producidos por la carga gravitatoria.

En este caso, la compatibilidad de deformaciones se realiza en los anclajes finales del pretensado, que anclan este en las dovelas extremas. Las dovelas de granito se suelen colocar a hueso y el diseño del pretensado se suele realizar de forma que no exista descompresión en las juntas en ninguna situación de carga.

Con esta tecnología la empresa alemana RS Ingenieros Achem ha patentado un sistema con el que se consiguen pasarelas de hasta 20 metros de luz, con unas esbelteces altísimas, del orden de 1/40 a 1/50 de la luz [FIG. 3].

Como en la pasarela de Inachus, una de las ventajas del uso de la piedra como tablero es que no requiere ningún pavimento adicional, ya que el propio granito cumple esa función.

La piedra en elementos a compresión: pilares y mástiles

Esta es, quizás, una de las formas en las que la piedra tiene su aplicación más directa. Aunque es cierto que un pilar o mástil está sometido a compresión simple de manera natural, si el pilar se materializa en piedra el axil debe de ser de tal magnitud que las posibles flexiones no provoquen la descompresión de las juntas entre las distintas dovelas que constituyen el pilar.

Un ejemplo singular de esta aplicación es la pasarela sobre el Hessenring en Bad Homburg v. d. Höhe, Alemania, proyectada por Schlaich Bergermann and Partners (SBP) y construida en el año 2002. En esta pasarela de 46 metros de luz principal y 6,90 metros de ancho, el sistema de atirantamiento transmite la carga a un mástil de forma arbórea, constituido por dovelas de gabro que se alinean mediante un cilindro de acero y que están cosidas entre sí. Para los autores, el mástil, además de su función resistente, constituye una delicada escultura tridimensional que enfatiza la conexión entre la estación de ferrocarril y el centro de la población. La obra es, sin duda, una excelente aplicación de la piedra en una obra singular con un marcado carácter formal [FIG. 4].

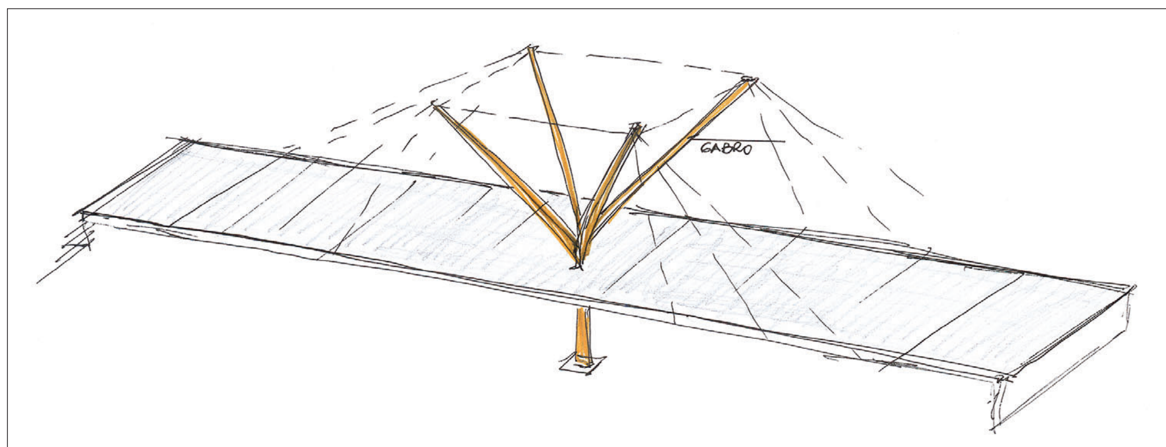


FIG. 4 Pasarela sobre el Hessenring.

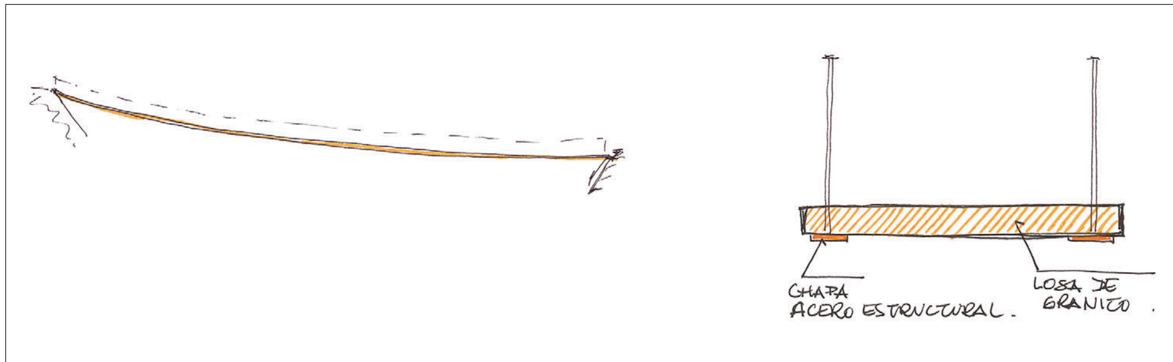


FIG. 5 Pasarela de Viamala.

El empleo de la piedra en bandas tesas

Otro sistema estructural en el que se está usando la piedra de una forma no tradicional es en las estructuras denominadas bandas tesas.

Jürg Conzett es el ingeniero autor de estructuras excepcionales como la pasarela de Viamala (1999). En esta obra, sobre dos bandas traccionadas de acero, se colocaron losas de piedra que se pretensan entre ellas para dar una mayor rigidez al sistema y servir al mismo tiempo de pavimento de la pasarela [FIG. 5]. Como se puede apreciar en la fotografía [FIG. 6], esta obra es un formidable ejemplo de elegancia.

Otra obra con una tipología similar a la anterior es la banda tesa de granito y acero Fehrlesteg sobre el río Rems proyectada en Schwäbisch (Alemania) por SBP y construida en 2014. Esta obra es una banda tesa de dos vanos de 30 y 22 metros de luz respectivamente y de 2,90 metros de ancho, formada por dos bandas de acero convencional (S355 J2+N) de 400,40 milímetros, sobre las que se colocan unas losas de piedra que se atornillan a las dos bandas de acero, constituyendo el pavimento de la obra y dando rigidez al sistema.



FIG. 6 Pasarela de Viamala de J. Conzett. Fotografía Katalin Götz.

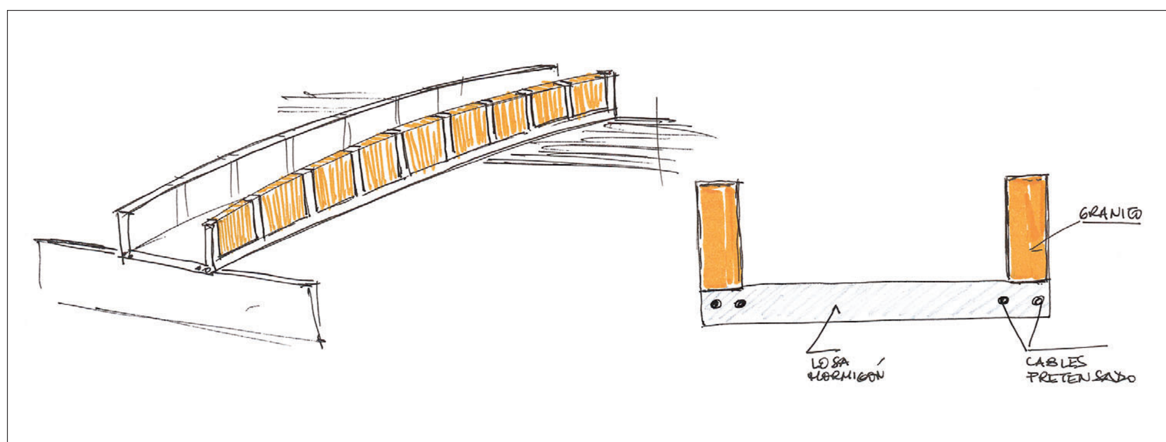


FIG. 7 Puente sobre el Rhin en Vals.

Estructuras mixtas piedra-hormigón

Un último grupo de aplicaciones de la piedra, en el ámbito del grupo de puentes contemporáneos, es el de las estructuras híbridas. El único ejemplo conocido por el autor, es el puente sobre el Rhin en Vals, proyectado también por Jürg Conzett y construido en 2010 (Dechau, 2013).

En este caso se trata de un puente de carretera que sustituye a un puente metálico que fue destruido por una de las crecidas del río. El puente tiene una sección en «U» y dos vigas laterales pretensadas construidas en hormigón y piedra, que soportan una losa inferior de hormigón armado que recibe las cargas de tráfico.

Las vigas laterales consisten en una sucesión precisa de piezas de granito, situadas en la parte superior de la viga (en la zona comprimida) entre las que se intercalan unos elementos de hormigón, a modo de grandes conectadores que transmiten el esfuerzo rasante de conexión con la parte inferior de hormigón de las propias vigas [FIG. 7].

En la parte inferior de la viga se coloca un pretensado para controlar la fisuración por precompresión del sistema.

El resultado es una estructura muy especial, en la que se emplea magistralmente la combinación del hormigón con la piedra aprovechando plenamente las características de cada uno de los dos materiales.

REFLEXIONES FINALES

Uno de los aspectos quizás más desconcertantes para la ingeniería estructural contemporánea es la enorme diferencia de ritmos entre la sociedad actual y los tiempos asociados al proyecto y la construcción de un puente. Estamos en una sociedad que se ha acostumbrado a la respuesta instantánea, que no encaja bien con la práctica del proyecto y la construcción de los puentes. En nuestro mundo, es habitual que pasen años desde que se decide emprender una obra hasta que esta se pone en funcionamiento.

Este desfase temporal, tan sustancial con nuestra actividad, debería situar al proyectista en una atalaya privilegiada desde la que se pueda abstraer de las prisas presentes. La concepción de una estructura supone la toma de una serie de decisiones que afectarán a varias generaciones. Por eso la abstracción es plenamente necesaria y fundamental, dada la repercusión en el tiempo que tienen nuestras decisiones.

En este sentido, el ingeniero no debería verse tentado a abandonar las soluciones en piedra en aquellos casos en que la magnitud del problema lo permita. Es cierto que las obras en piedra requieren el empleo de recursos especializados y son habitualmente algo más lentas de construir, pero son, sin duda, obras resistentes, duraderas y de calidad. Los puentes y pasarelas de piedra, proyectados con una visión moderna de las posibilidades de este material, son una seria e indiscutible alternativa a considerar cuando se quiera tener puentes de calidad, perennes y con la serenidad que impregnan las obras construidas en piedra.

NOTA

1. No solo está presente la iconografía. Anterior incluso a esta está la toponimia (Pontevedra, Puente del Arzobispo, Puentelarreina, Cambridge, Saarbrücken, etc.), en la que se hace referencia a una población que se crea precisamente porque existe un puente, casi siempre anterior al propio núcleo urbano. E. Bauder lo cita (Bauder, 2007) y dedica unas consideraciones al respecto en el texto de esta misma monografía (pp. 23-37).

BIBLIOGRAFÍA

BALLART, J. (1997), *El patrimonio histórico y arqueológico: valor y uso*, Barcelona, Ariel Patrimonio.

BAUDER, E. (2007), *Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

DECHAU, W. (2013), *Seven bridges by Jürg Conzett*, Zúrich, Scheidegger und Spiess.

Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica» del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR) (2014), *Criterios de intervención en puentes de fábrica*, Madrid, Asociación Técnica de Carreteras

IRANZO MUÑÍO, M.ª T. (1977), *Puentes medievales en la provincia de Huesca: Aspectos Económicos y Sociales*, Zaragoza, Universidad de Zaragoza.

LEÓN, J. y ESPEJO, S. (2007), «Load test to collapse on the masonry arch bridge at Urnieta», *Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges, September 2007, Madeira, Portugal*, pp. 969-976.

LIPE, W. O. (1984), «Value and meaning in cultural resources», en H. Cleere (ed.), *Approaches to archaeological heritage*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-11.

LYNCH, K. (1959), *La imagen de la ciudad*, Buenos Aires, Editorial Infinito.

ROMO, J. (2006), «El proyecto de puentes y su integración paisajística: Estrategias de Proyecto», en *1er Congreso Paisaje e Infraestructuras*, Sevilla, Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Transportes.

Volver al índice

Nota relativa al ensayo de un arco de dovelas de madera y rellenos rígido y granular

12 de julio de 2016
[https://www.youtube.com/watch?v=ccJSXkaZHCQ]

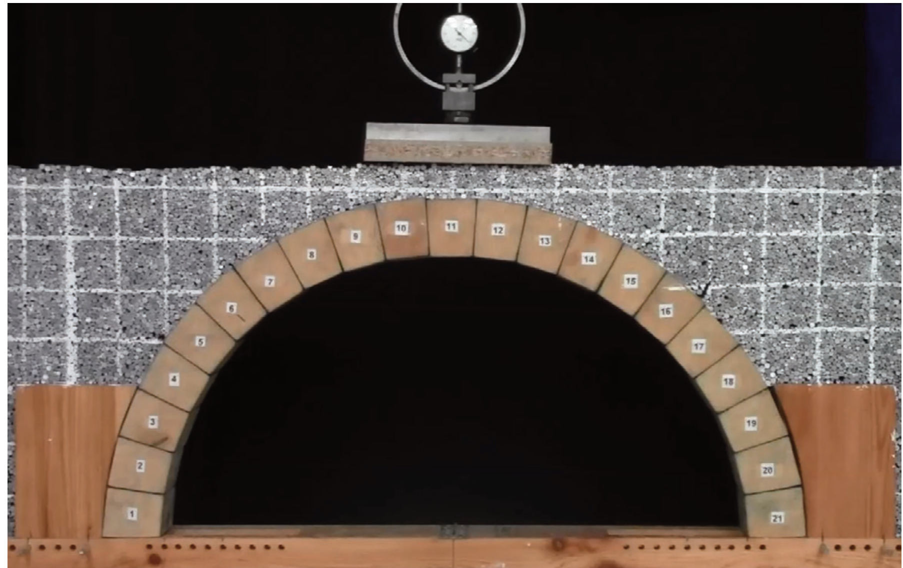
El modelo que se somete a ensayo es un arco de 21 dovelas de madera de pino (con un peso específico de 4,45 kN/m^3). La luz libre del arco de medio punto es de 80 cm (la flecha es, obviamente, de 40 cm) y el canto o espesor del arco es 8 cm. La dimensión de las dovelas, en la dirección perpendicular al plano de alzado, de 12 cm. En la parte inferior, del lado del trasdós, se disponen unas piezas de madera empotradas a la base para simular el efecto del relleno rígido del que están dotados los puentes hasta una altura igual, al menos, a la mitad de la flecha (las alturas reales son mayores, pero pueden haberse deteriorado las zonas superiores), es decir 20 cm en este caso.

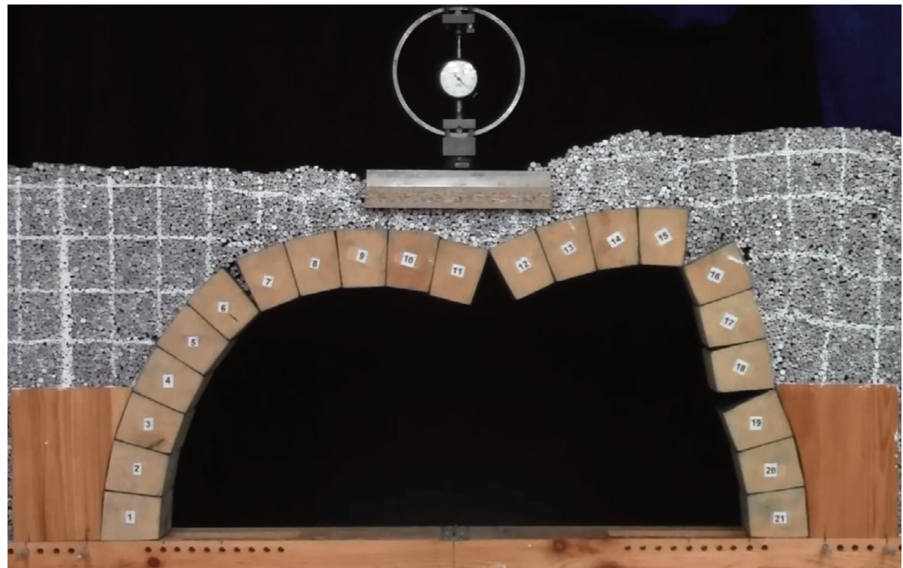
Por encima del relleno rígido y en el resto del trasdós, también sobre clave, se han dispuesto unas barras de metálicas que simulan un relleno granular. Las «características geotécnicas» propias de este relleno fueron calibradas por J. M. Rodríguez Ortiz en 1974, en una campaña experimental realizada en el laboratorio de Geotecnia de nuestra Escuela. Este relleno está formado por unas barras cilíndricas de duraluminio de 8 cm de longitud y diámetros de 2, 3 y 4 mm. La proporción de la mezcla de las barras es 1:2:3 siendo las de menor cantidad las de 2 mm, luego las de 3 mm y por último las de 4 mm. Ello da lugar a un material de 20,6 kN/m^3 de peso específico aparente, ángulo de rozamiento interno 22,5º y cohesión nula.

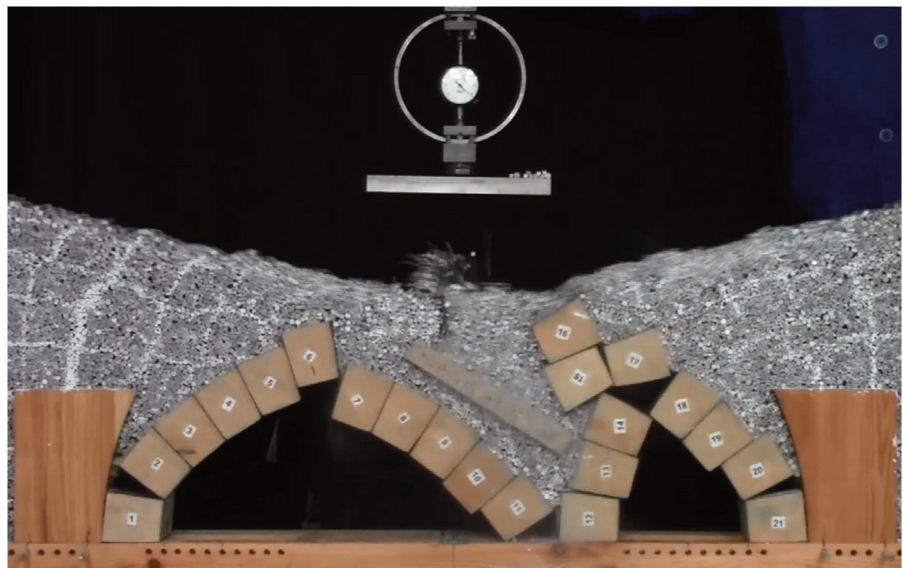
Sobre clave, previa disposición de una tabla de madera para asegurar un reparto más realista, se aplica una carga mediante un gato de tornillo que incorpora un anillo dinamométrico para medir la fuerza.

El objeto del ensayo consistió en mostrar a los asistentes al curso cuál es el comportamiento de un arco frente a la aplicación de una carga en clave y en qué medida interacciona el arco con el relleno, de misión estructural muy importante. Este modelo sirvió para realizar un estudio experimental en la tesis doctoral de Alejandro Ramos, presentada en noviembre de 2015. Lo interesante del ensayo es también dejar constancia de la gran ductilidad que exhiben estos elementos, capaces de experimentar grandes deformaciones antes del colapso. La filmación es autodescriptiva: no hay rótulas inicialmente, pero aparecen pronto hasta triarticularse el arco para, más adelante, formarse una cuarta rótula que convierte al conjunto en un mecanismo cinemático de colapso.

JAVIER LEÓN
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de la ETSICCP. UPM







Volver al índice

PUBLICACIONES DE LA FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

COLECCIÓN JUANELO TURRIANO DE HISTORIA DE LA INGENIERÍA

2016

SÁNCHEZ LÓPEZ, Elena y MARTÍNEZ JIMÉNEZ, Javier, *Los acueductos de Hispania. Construcción y abandono.*

2015

ZANETTI, Cristiano, *Juanelo Turriano, de Cremona a la Corte: formación y red social de un ingenio del Renacimiento.*

ROMERO MUÑOZ, Dolores, *La navegación del Manzanares: el proyecto Grunenbergh.*

LOPERA, Antonio, *Arquitecturas flotantes.*

MUÑOZ CORBALÁN, Juan Miguel, *Jorge Próspero Verboom: ingeniero militar flamenco de la monarquía hispánica.*

LECCIONES JUANELO TURRIANO DE HISTORIA DE LA INGENIERÍA

2017

LEÓN, Javier y GOICOLEA, José María (coords.), *Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño.*

2016

NAVASCUÉS PALACIO, Pedro y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *«De Re Metallica»: Ingeniería, hierro y arquitectura.*

CÁMARA MUÑOZ, Alicia y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *«Libros, caminos y días». El viaje del ingeniero.*

CÁMARA MUÑOZ, Alicia (ed.), *El dibujante ingeniero al servicio de la monarquía hispánica.* Edición en inglés: *Draughtsman Engineers Serving the Spanish Monarchy in the Sixteenth to Eighteenth Centuries.*

2015

NAVASCUÉS PALACIO, Pedro y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *Ingenieros Arquitectos.*

CÁMARA MUÑOZ, Alicia y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *Ingeniería de la Ilustración.*

2014

CÁMARA MUÑOZ, Alicia y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *Ingenieros del Renacimiento.* Edición en inglés (2016): *Renaissance Engineers.*

2013

CÁMARA MUÑOZ, Alicia y REVUELTA POL, Bernardo (coords.), *Ingeniería romana.* Edición en inglés ((2016): *Roman Engineering.*

OTRAS PUBLICACIONES

2016

SÁNCHEZ RON, José Manuel, *José Echegaray (1832-1916): el hombre polifacético: técnica, ciencia, política y teatro en España.*

2014

NAVASCUÉS PALACIO, Pedro y REVUELTA POL, Bernardo (eds.), *Una mirada ilustrada. Los puertos españoles de Mariano Sánchez.*

2013

CHACÓN BULNES, Juan Ignacio, *Submarino Peral: día a día de su construcción, funcionamiento y pruebas.*

2012

AGUILAR CIVERA, Inmaculada, *El discurso del ingeniero en el siglo XIX. Aportaciones a la historia de las obras públicas.*

CRESPO DELGADO, Daniel, *Árboles para una capital. Árboles en el Madrid de la Ilustración.*

2011

CASSINELLO, Pepa y REVUELTA POL, Bernardo (eds.), *Ildefonso Sánchez del Río Pisón: el ingenio de un legado.*

2010

CÁMARA MUÑOZ, Alicia (ed.), *Leonardo Turriano, ingeniero del rey.*

CASSINELLO, Pepa (ed.), *Félix Candela. La conquista de la esbeltez.*

2009

CÓRDOBA DE LA LLAVE, Ricardo, *Ciencia y técnica monetarias en la España bajomedieval.*

NAVARRO VERA, José Ramón (ed.), *Pensar la ingeniería. Antología de textos de José Antonio Fernández Ordóñez.*

2008

RICART CABÚS, Alejandro, *Pirámides y obeliscos. Transporte y construcción: una hipótesis.*

GONZÁLEZ TASCÓN, Ignacio y NAVASCUÉS PALACIO, Pedro (eds.), *Ars Mechanicae. Ingeniería medieval en España.*

2006

MURRAY FANTOM, Glenn; IZAGA REINER, José María y SOLER VALENCIA, Jorge Miguel, *El Real Ingenio de la Moneda de Segovia. Maravilla tecnológica del siglo XVI.*

2005

GONZÁLEZ TASCÓN, Ignacio y VELÁZQUEZ SORIANO, Isabel, *Ingeniería romana en Hispania. Historia y técnicas constructivas.*

2001

NAVARRO VERA, José Ramón, *El puente moderno en España (1850-1950). La cultura técnica y estética de los ingenieros.*

1997

CAMPO Y FRANCÉS, Ángel del, *Semblanza iconográfica de Juanelo Turriano.*

1996/2009

Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas de Juanelo Turriano.

1995

MORENO, Roberto, *José Rodríguez de Losada. Vida y obra.*

Volver al índice

La colección *Lecciones Juanelo Turriano de Historia de la Ingeniería* recoge principal, aunque no exclusivamente, las conferencias impartidas en los cursos que la Fundación organiza anualmente en colaboración con diversas universidades para contribuir al conocimiento de la ingeniería y a la puesta en valor de su relevancia cultural.

Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño es el resultado del curso celebrado en 2016 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Madrid). Es la octava entrega de esta colección, iniciada en 2012.

Las conferencias publicadas reflexionan, desde diversos puntos de vista y a cargo de renombrados especialistas e investigadores, sobre el papel de los puentes de piedra (o ladrillo) en los albores del siglo XXI, sobre sus desafíos y posibilidades, destacando el valor ingenieril y socio-cultural que tienen unos puentes que han ido perdiendo protagonismo desde la aparición de los metálicos y los de hormigón, pero que siguen poseyendo un extraordinario interés.



FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO